生命的战争

从细胞到不可思议的你 40亿年物种演化全记录

旭岽 著



北京联合出版公司
Beijing United Publishing Co.,Ltd.

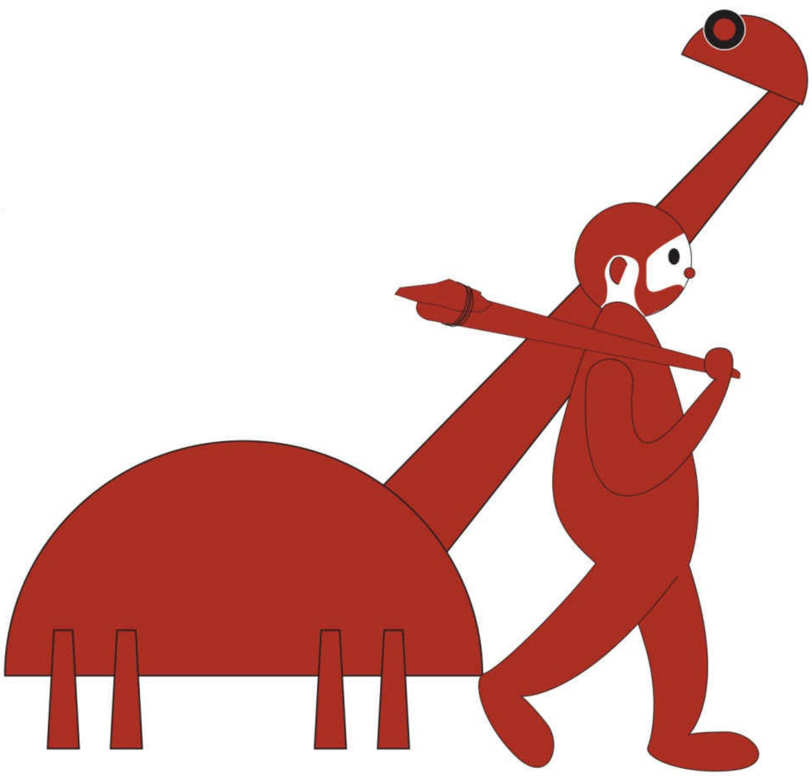
VISIT…

LANZAROTE Caliente.COM

生命的战争

从细胞到不可思议的你　40亿年物种演化全记录

旭岽 著



北京联合出版公司
Beijing United Publishing Co.,Ltd.

图书在版编目（**CIP**）数据

生命的战争 / 旭岽著．—北京：北京联合出版公司，2022.1

ISBN 978-7-5596-5697-1

Ⅰ．①生…　Ⅱ．①旭…　Ⅲ．①生命起源—普及读物　Ⅳ．①Q10-49

中国版本图书馆CIP数据核字（2021）第218739号

生命的战争

作　　者：旭　岽

出 品 人：赵红仕

责任编辑：刘　恒

北京联合出版公司出版

（北京市西城区德外大街83号楼9层　100088）

北京世纪恒宇印刷有限公司印刷　新华书店经销

字数：207千字　700毫米×980毫米　1/16　印张：21

2022年1月第1版　2022年1月第1次印刷

ISBN 978-7-5596-5697-1

定价：68.00元

版权所有，侵权必究

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书部分或全部内容

本书若有质量问题，请与本公司图书销售中心联系调换。电话：010-82069336



旭岽

知名科学节目主持人，中国科普作家协会会员、上海市天文学会理事。主持有《FM十万个为什么》《科学魔方》《极客秀》等多档高热度科学类节目。

科普自媒体“旭岽叨科学”以严谨有趣的内容收获众多受众，音频专辑《原来是这样？！》全平台累计收获近300万订阅，总播放量超过4亿。

序

在我主持过的各类科普活动中，涉及两个领域的话题时通常都会有极高的上座率和极为热烈的现场互动——一个是以恐龙为代表的“地球生命史”，另一个则是包含天文学、宇宙学以及航天工程在内的“太空探索”。

其实，这并不意外。科普界流传着这样一种说法：很多3岁到4岁的孩子，都会出现一个“恐龙敏感期”。类似地，不少5岁到6岁的孩子，还会有一个“天文敏感期”。毫无疑问，这两个“敏感期”，在我的童年都未曾缺席。

归结起来，前者意味着对于“过去”的好奇，试图回答的是“我们从哪里来？”；后者则代表了对于“外面”的向往，似乎可以指示“我们将到哪里去？”。也难怪，这样的问题对于我们这些将好奇心视作本能的智人来说，似乎有着与生俱来的吸引力。

我特别喜欢听古生物学家谈论时间，因为他们口中的几万年，不过是一瞬间。相似地，天文学家眼里的几光年，也仅仅是家门边。这样的气势与格局，的确很难在其他学科里感受到。

不仅是孩子，相信每一个成年人，置身于时间长河时，都会感慨生命甚至文明的短暂。同样地，一旦意识到自己正身处于一个近乎无穷的浩瀚空间，个体乃至星球的渺小，也会被衬托得淋漓尽致。而这样的反差，也恰恰提醒着我们：未知还有太多，探索之路将永无止息！

当然，这两个领域的话题，在这本书中都会涉及——这本身也并不矛盾，毕竟地球本身也是宇宙的一部分，而地球史上的不少重大事件，也与空间环境的变化有着密切的联系。不过，考虑到以后应该还会有一本专注于宇宙故事的书，这本书更侧重讲述的，还是在地球这个“宇宙

的小角落里”，由生命所谱写的一幕幕史诗般的故事。

最早的那批可以自我复制并且随机突变的复杂有机分子，是经历了怎样的发展，才造就了如今这个多姿多彩的生命世界？生命为什么要登上陆地？鸟类为什么要学会飞翔？鲸为什么会重返海洋？两性、胎生、毛发、直立……这些属于我们的似乎是天经地义的特征，究竟是如何发展出来的？相信，这其中肯定也会有曾令你感到困惑的问题。

这些年，一种名为“沉浸式戏剧”的演出形式令我十分着迷——演员们仿佛被困在了某段时空之中，一次又一次地重复着同样的故事。作为观众的我们，可以一次又一次地进入这个时空，跟随不同的角色，了解他们所经历的故事。每一位角色的故事线，就像是一块拼图，只有将大部分的拼图悉数凑齐，整个故事的全貌才会真正浮出水面。

记得第一次体验的时候，我并没有掌握好技巧，东走西撞。结果，看到的只是一幕幕荒诞离奇的冲突，虽然足够新奇和刺激，但由于不了解前因后果，感觉只是一头雾水。而当我转变策略，开始有计划地跟随，并且与其他朋友分享线索后，逐渐地，每一个诡异的情节，似乎都有了通顺的逻辑。

这真的很像接触地球生命史的过程——最初的震撼，可能来自博物馆里巨大的、奇怪的骨头架子。这些史前怪兽，仿佛凭空出现，又忽然消失。你会有很多问号：它们为什么长这样？它们为什么要这样生活？它们那么厉害，为什么又会灭绝？

当我们相对系统地顺着一条又一条线索去追寻，并且将这些故事交织在一起后，迷雾仿佛渐渐散去了——原来这一切是这样发生的。如果你恰好是《原来是这样？！》的听众，想必对于这种感觉，你应该更有体会。

有关于地球生命史的书籍很多，其中不少也对我了解地球的过去起到了重要的作用。但这一本书，我并不想过于严格地去遵照时间线，或

者地质年表，把地球生命的故事一层一层地讲给你听。我更希望循着一条条迷人的线索，跟随着一位位有趣的角色，一次次地回到过去，通过一个又一个不同视角与尺度的故事，最终构建出一部细节丰富同时尽可能接近真实的地球生命史诗。

目 录

作者简介

序

第一章　从无性到多性，生命起源的几种可能

　　“第一个生命”，它到底是从哪里来的？

　　DNA纠错说，细胞分裂误记说，关于有性繁殖的未解之谜

　　如何定义性别？既不是看性征，染色体也不是关键

　　车速略快——最早的“丁丁”和各式各样爱的狂欢

第二章　冰冻解冻又冰封，生命的爆发与灭绝

　　雪球事件：从最冷的时候开启

　　浩劫与重生：寒武纪生命大爆发

　　大登陆时代：苔藓登陆和四脚的鱼

第三章　浩劫之后又重生，地球生存争霸战

　　兽族崛起，从“哺乳动物”的祖先说起

　　龙族的黎明，以一场持续了近200万年的雨季开始

　　逆境中的兽族，在巨龙的统治下绝境求生

　　侏罗纪漫游指南，这时候的大陆大气和生物

　　恐龙帝国谢幕，新生代演化竞赛开启

第四章　海洋陆地来回折腾：深渊帝国的王位轮替

　　原住民的进击和归来的王者

　　“龙族”重返海洋，放弃与进化之途

　　鲸的奋斗史：升级装备称霸深海

第五章　先有羽毛还是先有鸟？进击的飞行

　　飞行开拓者，翅膀从何而来

　　空中巨无霸，迷人的谜题

　　蓝天统御者，毛茸茸的恐龙？

　　暗夜飞行者，成功的蝙蝠

第六章　最终的王者：人类兴起

来，先给“人”一个定义
走出非洲，智人登场
线粒体夏娃，美国总统都是一家人？！
肤色的由来，白人为什么那么白？
人科的亲戚，那些猩猩们
猩球崛起？！
番外　如果宇宙只有一年
终章　未来
未来那些事
写在后面

第一章　从无性到多性，生命起源的几种可能

“第一个生命”，它到底是从哪里来的？

这一部分，我们先从这个最为本质的问题开始。

我们曾试图用逻辑的方式解答“先有鸡还是先有蛋”这一古老的问题，虽然最终通过“先下定义再讨论”的方式找到了答案，但仍有一个悬念并没有解开：鸡生蛋蛋生鸡，如何一代一代繁衍，一代一代变异，在自然选择的作用下变得更加高等，更加复杂。

家鸡的祖先是原鸡，原鸡的祖先是某种鸟类，再早则是某种恐龙，而恐龙之前是某种爬行动物；爬行动物起源于两栖动物，两栖动物源于某种四足鱼，更早可以追溯的祖先应该是无颌类的某种鱼儿；一路向前，则是多细胞生物、单细胞生物……

顺着这条藤一路往上爬，似乎无穷无尽。同样，我们（人类）从哪里来，一样可以遵循类似的线索往上追溯，人—古人—猿人—灵长目祖先—哺乳动物祖先—羊膜动物祖先，等等。

说起来，归根结底的尽头还是有的，那就是所谓的“第一个生命”，它到底从哪里来？



这句在如今的我们看来是吐槽的话，

生命从哪里来，总不见得是石头缝里蹦出来的吧？

这句在如今的我们看来是吐槽的话，放到第一个生命身上，反倒成了可能性很大的一种表述——毕竟，因为已经是“第一个生命”了，那它肯定不是其母亲所生的。

这是一个涉及范围极广的问题，当今世界最顶尖的科学家也不敢站出来打包票地说：“我能告诉你答案，生命就是这样来的。”毕竟，起源问题，贯穿了整个的人类文明史，所有文化活动，无论是神话、宗教还是哲学、科学，都不得不把起源问题作为自己的终极内核。

浓缩下来，就有三个核心的问题：宇宙起源、生命起源、人类起源[(1)]。

这三个最前沿、最终极也是最基本的科学问题，就像一个遥不可及的目标，激励着一代又一代科学家，穷极一生又一生地不断探索。所以，今天能带给大家的，只是诸多关于“生命起源的可能性”中的几种。

不过，整个探索过程本身，也已经足够迷人了——宇宙起源的问题，在后面会有探讨。人类起源则会在第六章具体展开。[(2)]但奇点之前的“无”和人类的“自由意志”等目前还没有明确的答案。相比之下，生命起源似乎没有那么玄妙，甚至给科学的介入留足了窗口。

自然发生论

接下来登场的便是“自然发生论”[(3)]了。这个观点认为：生命是从非生物环境中自然产生出来的。

直到19世纪，这种可以追溯到亚里士多德的古希腊哲学思考，仍然被西方学术界的一些人士所支持。但如果以现在的知识再回头细看“自然发生论”的观点，就有许多好玩的地方了。他们认为，某种复杂的生物有机体是由腐烂的有机物质产生的。比如：蚜虫来自植物上的露水，苍蝇来自腐烂的物质，老鼠来自肮脏的干草，鳄鱼来自水体底部沤烂的木头，诸如此类。

对如今的我们来说，“生命演化”已经深入人心，所以自然会觉得“自然发生论”指的是“最早的生命起源于某种非生物环境”——但事实上，“自然发生论”却认为，老鼠、鳄鱼这样复杂的生命形式，也可以在非生物环境中直接诞生，基本和孙悟空是从石头缝里蹦出来的没啥区别。



进入17世纪，就已经有人开始怀疑这些假设了。最有力的一击来自1668年，意大利一位叫弗朗西斯科·雷迪的医生做过一个著名的实验：一块与外界隔绝，使得苍蝇无法产卵的肉，最终没有长出任何蛆。此后，各种实验事实逐渐说明，至少对于肉眼可见的高等生物而言，它们无法在某些环境中不经过上一代的生殖行为直接产生。

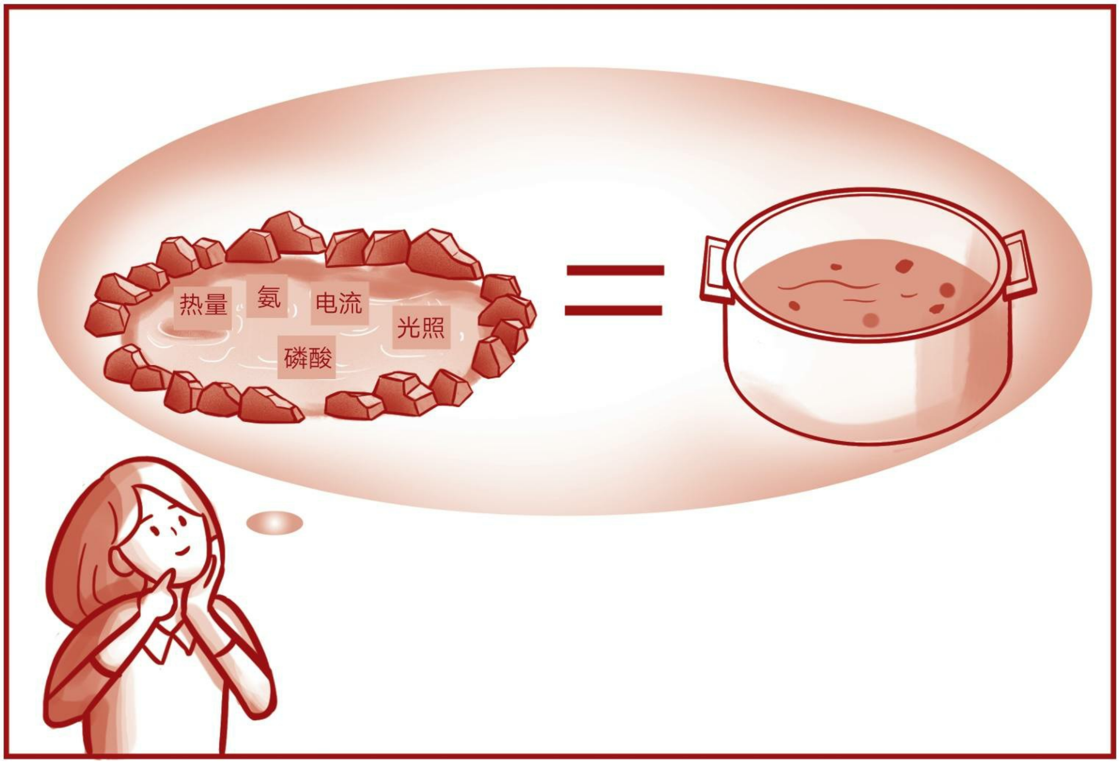
当时的人们就想：高等生物不可能“无中生有”，那肉眼不可见的微生物有没有可能是这样“无中生有”的呢？当时持这种想法的人不在少数。

直到1861年，大名鼎鼎的巴斯德进行了包括那个大名鼎鼎的“鹅颈瓶肉汤实验”在内的一系列实验，从而证明了细菌和真菌等生物不会自发地在无菌的、富营养的媒介中产生，只能通过外源的侵入才能出现。巴斯德在实验后曾断言：“这个简单的实验将把无生源说打翻在地，绝无翻身的可能。”直到这个时候，依赖于巴斯德及其他人的努力，“自然发生论”才算是被有力地证伪了。

接下来，“生生论”[(4)]便占据了主流。

这一理论基于巴斯德的实验结果——生物只能来源于生物，非生命物质绝对不能随时自发地产生新的生命。

不知道你是否意识到：如果不讨论过去，只讨论当下和未来，那“生生论”的确没错。但当我们探讨生命起源时，这一理论却有一个硬伤——如果说最早的生命也必须来源于生物，这不是一个悖论吗？



因此，“自然发生论”解释不了当下，却能够对最初生命的诞生自圆其说；而可以完美解释当下的“生生论”，面对起源问题时，却犯了难。好在，这一时期还有一位“大神”活跃在科学界，那就是达尔文。

1871年，在一封信中，达尔文表达了自己的意见：“生命最早的火花诞生在一个温暖的小池，里面满足各种条件：氨和磷酸、光照、热量、电流等，使得蛋白质化合物能够化学合成，并经历更加复杂的变化[(5)]。在现在，这种物质会被立即吞噬和消化，使得生物形成之前的情形不会复现。”

是不是和我们现在比较熟悉的观点有很多类似的地方？顺便说一下，达尔文的这一观点只是推测，但他在当时梳理了这样一条逻辑——与其探讨最早的生命可能是从无到有的，不如再往前看一步，那就是组成生命的各种部件，是如何产生的。有了这一基础，之后的讨论才会有意义。

你别说，关于生命起源的探讨，就有一个非常著名的观点——化学

起源说，而它的昵称就是“原始汤”！在这背后，又有一个大名鼎鼎的实验：1953年的米勒实验。没错，又是一个煮汤实验。

米勒的“原始汤”

当时，美国芝加哥大学的青年学者米勒在一位研究天文物理学的教授那里获得了一个重要事实：那些远离太阳、历史上可能变化较小的巨行星（如木星和土星等），它们的大气都是没有游离氧的还原性大气，其主要成分是氢、氦、甲烷和氨。

希望探究生命起源的米勒忽然想到——既然太阳系的行星都是一团星云生出来的，那么早期地球的大气环境想必也是这般的还原性大气，而这会不会成为生命构件分子合成的原料呢？

米勒在一个大烧瓶中装了水和氨气、甲烷、氢气等混合气体，向这团混合气体通入电火花来模拟闪电，然后等待。在几天、几周、几个月后，他分别从中取样并进行分析，来判断他到底“煮”了些什么出来。而他的发现，令科学界疯狂了！

当然，这锅“汤”并没有直接“煮”出生命，但这其中包含了一堆近乎神秘的有机分子混合物，其中有几种氨基酸，而且不是什么稀奇古怪的氨基酸，恰恰属于我们生命体组成的20种氨基酸——要知道，在DNA尚未出名的20世纪50年代，这种蛋白质的组成部件无疑是最具象征意义的生命分子。

这锅“原始汤”不就是达尔文想要的东西嘛！

在后续进一步的改进实验中，他将氨气换为氮气，因为氨气易分解且极易溶于水，不可能在地球上长期高浓度地存在；又添加了对原始地球可能发生的光解和热解过程的模拟[(6)]，烧瓶中甚至产生出生物使用的20种氨基酸中的17种。不知你是否有同感——这实验再继续下去的话，似乎最原始的生命就快被直接“煮”出来了。

正当所有人都为之振奋时，谁也没有想到，峰回路转的剧情出现了——对远古岩石的分析发现，地球从未被甲烷、氨气和氢气覆满，至少在小行星大轰炸后就没有过。更加符合现实的原始大气层模拟则令人失望：那是一堆二氧化碳和氮气，混有少量的甲烷，通电后几乎无法检测到任何有机物。

这种经历就好比一道巨长的数学证明题，眼看着就要做完了，结果老师忽然告诉你，题目出错了。

好在，又一次的反转，拯救了“原始汤”——在对小行星和彗星的研究中，人们出乎意料地发现大量有机分子，在取样检测后，发现其中的氨基酸序列竟然和米勒烧瓶中的十分相似。看来，生命结构在宇宙中的确有什么不同寻常之处，以至于生命分子也成为某种备受青睐的集合，在诸如米勒烧瓶中的通电环境或太空中高强度辐射等差异巨大的合成环境中合成的有机分子，恰恰都是那几种生命分子。

在这个时候，历史上已经多次出现的宇宙起源学说又再次被提及，小行星大轰炸也不再是灭世般的力量，反而成为行星的生命之光——不仅为地球输送了巨量的水，还送来了有机分子之源。尽管大部分有机分子都会在撞击的一瞬间“灰飞烟灭”，但计算机模拟显示，总会有些漏网之鱼，日积月累之下，“原始汤”仍然可以建立。

虽然，我们尚不能直接下这样一个结论——生命起源于类似这样的“原始汤”中，但米勒的贡献依然是里程碑式的，他向我们演示了，有机分子甚至是更特殊的生命分子，都可以通过简单的无机原料经过简单的步骤合成。无生命的物质可以一个跳跃变成“几乎是生命”的物质。

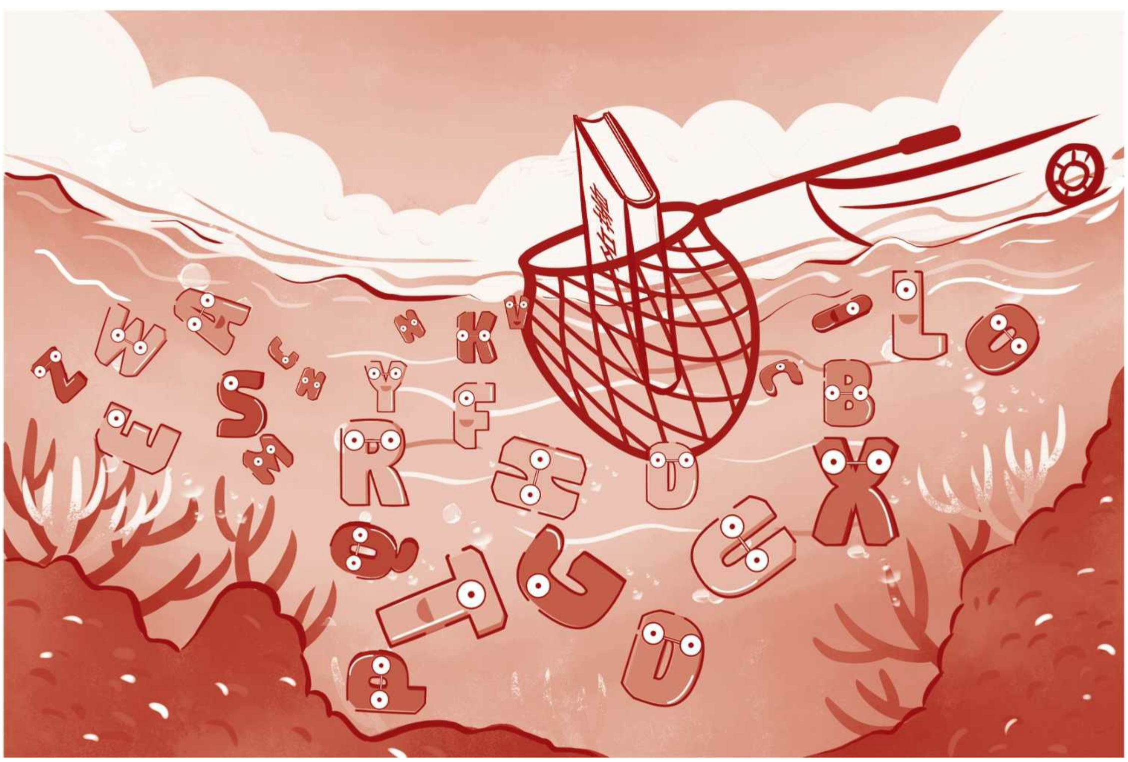
现在基本可以确定，组成生命的那些零部件，可以在原始的极端环境下组装起来，但要让那么多的零部件自己组合起来，并让它们自行运转，以及自我复制……这中间其实还需要好多好多。因此，单有构件分子还不够，物质结构要发展成为生命，撇去一切细节，它首先得是个能满足一定功能需求的多分子体系，这样才有接下去的可能。

海相起源说

既然米勒实验证明了“原始汤”的可能，那很自然地，人们就会猜想到早期地球的海洋很可能会逐渐熬成一大锅浓稠的“汤”，“海相起源说”也因此应运而生并大行其道，解释从有机小分子到生命大分子的神奇跳跃。在“海相起源说”的猜想里，在海洋浓稠的“原始汤”中，各种大分子由小分子通过化学键像串珠一样串起来而生成。一旦大分子素材出现，接下来便是“进化论”的天下了。

大分子们不断生成、互相竞争、变异、淘汰、组合，最后形成鬼斧神工的分子机器，主动摄取能量，实现自我保存、自我复制、自我扩散，在自然选择的威力下遗传和进化——这依然满足对生命最苛刻的定义。

你或许会想：“原始汤”就是遍布字母的字母表海洋，只等着自然选择把它们捞起来，变成一篇惊世骇俗的不朽名著？！



光是这样想，似乎说得通，这个假说的确也很强势，即便现在很多中学教材也会这么讲。可惜了，大自然更强势，或者说科学的质疑和批判精神比任何科学内容都更强势。

跳出来质疑的是统计学家，最著名的论断来自大名鼎鼎的天文学家和数学家弗雷德·霍伊尔，他说："生命起源于地球的概率就像大风吹过机械垃圾场能组装出一架波音747的概率。"随后，连DNA双螺旋结构的发现者之一克里克都为其助阵。他们说，生命要么起源于别的地方，最终"感染"了我们的星球，要么纯属偶然。理论支持也很简单：地球上没有足够的时间，不足以演化出这般复杂的生命。

意思就是，虽然概率上有可能，但是根据已知的有限的时间范围，这件事情要发生还是非常不可能的。

这近乎断言现在的科学不足以解决这个问题。因此，大部分科学家对此并不认同。倒是各路神学家、科幻作家把这个观点捡了起来，包装一下，就成为"自然目的论""智慧设计论"等最好的"武器"，向进化论发起猛烈的炮轰。

还好这时又有一位大牛站出来，声名显赫的诺贝尔化学奖得主克里斯汀·德·迪夫发表了更加激动人心的论断：化学的决定性意味着生命一定会快速涌现。生命起源当然是个化学问题，而化学反应的事实告诉我们：反应要么较快地发生，要么永远不发生。如果一个反应需要花上一千年，那从概率上说它的反应物早就弥散消失或者直接就分解了，除非有源源不断的补充。照他的逻辑，生命在1万年内起源比在100亿年内诞生的可能性要大得多。

这样一来，"原始汤"理论就站不住脚了。因为倘若一大锅"原始汤"孤零零地熬在那里，不加任何特别干预的话，它在热力学上就是"死"的。以一个极端的假设为例，拿一大罐消毒的牛肉汤密封起来搁上几百万年，难道就会有生命从其中诞生出来吗？

当然，地球曾经的“原始汤”不是单纯搁着，自然界还会有闪电、强烈的紫外线。不过对于强热、电场、辐射等一切粗暴输入的能量形式，它们擅长的是撕裂化学键，而非促成新化学键的形成。换言之，它们是推动分解反应的行家里手，推动合成反应完全就是蹩脚工匠。熬出一锅“原始汤”的确超出了化学家的想象，但从“原始汤”中再熬出一锅生命来，已经不是人们想象力的问题了，这几乎是在正面对抗“热力学规律”。

可是，生命就在那儿，它确实是演化出来了，容不得一点质疑啊！

这正是这个问题最有意思的地方。也有人说，这就好比你在键盘上随机敲出了100个字符，虽然，再一次随机敲出这样一串字符的概率极低极低，但你不能说，你根本不可能再一次随机敲出这段字符。

但弗雷德·霍伊尔和克里斯汀·德·迪夫的观点又似乎站得住脚了？这个时候，唯一的可能性就是，“原始汤”理论一定存在某些问题，即使不是全盘皆错，也至少忽略了什么至关重要的细节。转机，出现在了1977年的加拉帕戈斯群岛。

海底起源说

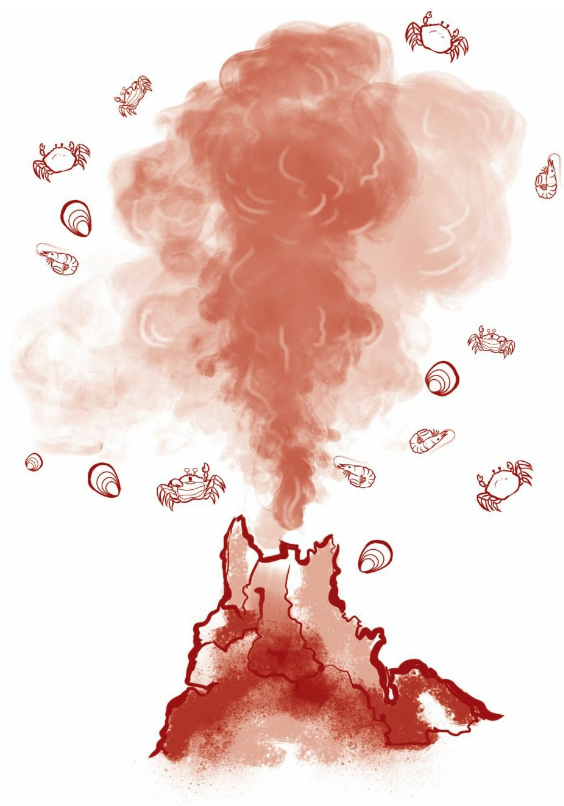
在达尔文乘坐“贝格尔号”经过此地的近150年后，美国海军的深潜器执行了一场裂谷深潜行动。在那里，科学家见到了海底的“黑烟囱”（详见第二章第3节）。

这种海底热泉口真的很有意思，称之为“黑烟囱”也十分形象：它喷出的当然不是煤烟，而是灼热的强酸性的液态金属硫化物[7]，通过地质活动从地壳深处的岩浆“熔炉”中喷涌出来，遇到接近0℃的海水冷凝的沉淀。

“烟囱”本身就是之前沉淀的含硫化合物组成的，典型的例子如黄铁矿。“烟囱”是在不断生长的，有些“烟囱”一天就可生长30厘米，在最终

垮塌之前甚至可以长到100米。但更令科学家震惊的，则是“黑烟囱”附近那出乎意料的“热闹”！

生命在这种极端的情况下，依然顽强地存活着！漆黑、高压、高温，极端的环境中，科学家看到了各种各样仿佛只在疯狂的梦境中才能出现的生命：没有口也没有肛门的庞贝蠕虫、不计其数的没有眼睛的盲虾、在120℃水温下自由活动的蟹类和餐盘大小的蛤与贻贝。



当然，令科学家惊叹的肯定不是又发现了许多新奇的海鲜——他们好奇的是，对于“黑烟囱”如此庞大的生态系统，它最初的能量输入究竟是什么？肯定不是太阳，数千米的水层可以吸收几乎所有的太阳光辐射；也肯定不是热泉的热量。如前所述，高热是破坏那里的行家里手，要小心翼翼地合成携带生物可用的化学能的化合物，是几乎不可能的事。真正的奥秘，便在高温下与含硫矿物一起冲出地壳的硫化氢（H_2S）上。是的，就是化学课上著名的那种“有毒，有臭鸡蛋气味”的

气体。

硫化氢是一种非常强的还原剂，强还原性意味着高反应活性。生物代谢的各种底物在自然环境下都是“冷淡”的，但它们一碰到硫化氢就立刻热情似火。虽然不知道具体的反应路径，但这至少赋予了生物代谢合成理论上的热力学动力，而经验告诉我们，生命就是如此强势，只要存在理论上的可能又恰好是生物需要的，生物总会进化出让所有合成化学家自惭形秽的反应方案。

没过多久，生命起源学界便注意到了这样的深海“黑烟囱”世界。在这里，“原始汤”的很多问题迎刃而解，最明显的就是热力学问题。在泉口和海洋交界的重重黑烟中，没有什么可以和平衡二字扯上关系。不过硫细菌的代谢模式还不足以作为起源的参考，因为它的反应是需要氧气的。可蓝细菌出现以前的古地球显然是没有氧气的呀！

这时候，德国的一位化学家兼专利律师甘特提出了一个惊世骇俗的观点：早期地球的生命活动靠的是“铁”。众所周知，三价铁也是无机化学重要的氧化剂。生命最早的引擎就是铁和硫的反应，反应可以自发进行，产物是硫化亚铁，也就是黄铁矿，这在“黑烟囱”附近可是大把大把的。

根据化学原理，甘特这样设计他生命起源理论的细节。由于铁和硫的反应放能不足以推动二氧化碳（CO_2）生成有机物[8]，因此甘特选择了“黑烟囱”附近另一种常见的碳氧化物（CO）作为有机分子合成的底物。更激动人心的是，过渡金属元素化合物往往能够成为优良的无机催化剂，硫化亚铁也不例外。在硫化亚铁的推动下，迟缓的有机反应得以大大加速，生物大分子的合成就不用再经历宇宙尺度的时间等待。

甘特不仅仅是说说而已，他和他的团队还在实验室实现了他在理论上预言的很多反应，大大推进了米勒实验的广度和深度。似乎，曾经存在过一锅关于生命起源的“原始汤”，但这锅汤的原料不来自太空，这口锅也不在海洋上层，而在海洋的底部——并且这口锅、这锅汤都是活

的，是很有可能合成出有意义的生物大分子的！

是的，生命的起源竟然发生在地狱一般的环境里？！

科学界炸锅了！甘特的理论受到了猛烈的批评。而在一系列的反击之中，有一项批评，可以说是切中了要害：甘特的生命起源理论和“原始汤”理论一样，存在致命的漏洞——浓度问题。在开放系统中，任何聚集的化学物质浓度都趋于扩散、淡化，这是简单物理原则决定的，而无论是“原始汤”还是深海热泉口都是这样的开放系统。但是我们知道，化学反应必须依赖一定的浓度，倘若反应物被无限制地稀释，活化分子将很难发生有效碰撞并生成DNA、RNA和蛋白质这样的多聚物。此外，他理论中硫的分量太重了，这和现代生物化学的图景格格不入。而且，“黑烟囱”是酸性环境，他模拟的实验都只能在碱性的环境实现。

不过，给予甘特的理论沉重一击的是另外一个理论。这个理论是二十世纪最伟大，也是最反直觉的生物学发现。它的发现近乎重构了生命科学的研究格局，当然也深刻地冲击了生命起源领域。

1967年，“斯皮格曼的怪物”闪亮登场！

斯皮格曼是美国伊利诺伊大学的分子生物学家，他设计了一个实验，想用来确定自然选择条件下最小的遗传个体。他把一种非常简单的病毒从寄生细胞里分离出来，放在充满必要营养物（也就是各种有机小分子）和必要催化酶的溶液中自由生长。这种病毒只有4500个碱基对长，可谓极其简单。最初这些病毒正常复制，接着，有一些复制发生变异，丢失了基因。

如果在寄生细胞中，病毒丢失基因意味着缺失某种功能，那么下场就是死亡。但在这个接近“原始汤”的充裕环境中，这反而成了优势：更短的序列复制更快，抢占资源更多，淘汰基因序列更长的对手。最终的结果是病毒逐渐退化成了只有220个碱基对的破碎残片，以疯狂的速度复制，充满整个培养液。这个实验结果不但和其他科学家重复的结果相

同，而且，换成更复杂的病毒后，结果仍然类似。

也就是说——自然界不一定会从字母表里拣出一个章句，反而可能把一个章句打碎成一堆字母。这狠狠地击碎了“原始汤”理论的幻想，同时似乎还预示着病毒不太可能是早期的生命形式。

对简单生命而言，复杂化反而不利于它们适应，简单化和退化才是大势所趋。

一切，似乎又回到了原点。或许你也和我一样，想穿越回去，亲眼去见证一下生命从无到有的伟大一刻。可惜，我们做不到，甚至永远也做不到——科学并不是历史学或者侦探学，即使有一天我们可以从试管中培育出生命来，我们仍无法断言这个过程是否真实发生过。三十多亿年足以湮灭我们所能想象的所有物质证据，或许我们永远无法探知和还原地球历史上对所有生命意义非凡的一天究竟发生了什么。

那，还要科学做什么？！

这其实就是这段分享的实质——这就是真真实实的科学探索，答案依旧缥缈，但过程却依然重要，即使某个假设最终被证明是错误的，但也好歹给我们做了一次排除。更何况，在探索过程中的一系列副产品，已经不止一次地改变，甚至颠覆了我们的生活和认知。

DNA纠错说，细胞分裂误记说，关于有性繁殖的未解之谜

上一节，我们试图回答——我从哪里来，这个巨大而深刻的问题。可说了半天依然是个未解之谜。今天想和大家分享的，则是一段更加壮阔的故事——繁殖的故事。

不要多想，如果真要回答“我从哪里来”这个巨大的问题，生殖，又的确是个绕不开的话题。生命这个词，从汉语的角度来看——生在前，

命在后。在我的理解中，生，意味着诞生、生育，也就是繁殖；命，则代表着个体的存在和活动。从宏观的视角来看，繁殖，对于生命而言似乎是一个必选项。

对于个体而言，存在的时间总是有限的，但对于生命这个整体而言，由于生殖这一行为的存在，永恒似乎变成了一件不那么遥不可及的事情。另外，各种千奇百怪的生殖方式的存在，又让生命得以历经无数次的浩劫，依然生生不息。演化也好，适应也好，离开了生殖，就都无从谈起了。

比生命本身，更伟大的是繁衍生命的过程。接下来，我们就来看看，“繁殖”，是如何发展成今天的模样的。

微球体学说

上节说到，由于各种复杂的因素，无机小分子结合成了有机小分子，有机小分子聚合成了生物大分子——比如蛋白质、核酸什么的。但这些还不是生命，因为它们不会“生”。确切点说，它们必须精巧地组合成高度有序的独立多分子体系，才能表现出新陈代谢、生长、繁殖、复制等生命现象。

可这一步的跨越，细想之下真的还是很诡异，结合之前的比喻，简直就是一阵风吹过了一堆零件，然后一个机器人就出现了，而且这个机器人还能寻找新的零件，组装出同类。

关于蛋白质和核酸怎样形成多分子体系有两种学说。一种是团聚体学说，另一种则是微球体学说。20世纪50年代末，苏联化学家奥巴林等科学家发现用多种生物大分子，如明胶、阿拉伯胶等各种蛋白质以及核酸、多糖、多肽和多核苷酸溶液等，在一定的温度和酸碱度条件下，能形成有各种类型代谢现象，如吸收、合成、分解、生长、生殖等类似生命的现象的团聚体。

但这个学说也存在一个重大的缺陷——那就是用于团聚体研究的大分子物质都是通过生物合成的，而目前为止，在类似米勒实验这样的模拟原始地球条件的实验中，也依然没有成功地通过非生物的途径合成出当今的生物大分子。就好像是：虽然从一堆报废飞机零件中组装出了一架看上去能开的飞机，但却无法证明从一堆报废的冰箱零件中也可以组装出飞机。

另一种则是福克斯提出的微球体学说。1960年，福克斯把酸性类蛋白放到稀薄的盐溶液中冷却，或将类蛋白水溶液的温度降低到0℃左右，便出现了福克斯所谓的类蛋白微球体。在显微镜下观察微球体，会见到大量直径为0.5～3μm的双层膜球状小体。

虽然微球体小球并没有生命，但它表现出类似细菌的某些特性，如有膜、能收缩、有群聚倾向、可染色、能分裂和出芽。分裂是1个变2个或彼此连成一串。由于类蛋白微球体比较稳定，又是在模拟原始地球的条件下由非酶促合成的类蛋白所产生，所以，当时就认为它应该是一种比较理想的多分子体系或原始细胞模型。

但是，用微球体和真正的生命作比较，就会发现依然有天壤之别。就拿大家相对熟悉的大肠杆菌和微球体来说：微球体是从一端出芽进行繁殖，大肠杆菌则是从中间分裂进行繁殖；大肠杆菌在分裂前首先进行遗传物质复制，把完全相同的一份生命信息传到子代中去，保证孩子和它具有完全相同的基因，而微球体则是空泡，里面根本没有遗传物质。也就是说，微球体实际上就是一具空壳。

这几乎就是区别是否是生命的最本质的不同了。此外，早期的微球体模型中没有核酸的成分，核酸从何而来；而后来蛋白质和核酸如何组合更搞不清楚。话说回来，在实验室里微球体是相对容易制得的，可生命在地球上是经过亿万年的漫长历史才诞生的，因此我们试图在实验室里面一步登天地获得原始的生命，这本身就不太可能。

从多分子体系的建立到原始生命的诞生，我们暂且也只能提供给大

家上述的两种学说了。接下来，我们的时空列车继续前进。在时空迷雾中，多分子体系形成了，这种东西能够不断地进行自我更新、自我繁殖和自我调节。于是乎，原始的生命诞生了！

原核生物

现在认为，最初的原始生命或许是非细胞形态[9]，经过漫长的历史演变，逐渐发展成具有细胞形态的原核生物，通俗地说，就是广义的细菌。

这时候生命的繁衍方式是什么呢？前面提到大肠杆菌的时候已经说过了，就是“分裂”：一个生物体实实在在地分裂成两半，分裂后的子细胞能得到亲代细胞的一整套遗传物质，形成两个几乎一模一样的生物体。

1、2、4、8、16、32、64、128、256……瞧瞧人家这效率！

某种意义上，我们最古老的祖先们，可都是这么干的——分裂生殖又叫裂殖，最古老，也是无性生殖中常见的一种方式。除了一分为二，也有一分为三甚至更多的“复分裂”。在单细胞生物当中，二分裂依然是繁衍的主流方式。如果要细分的话，又有无丝分裂和有丝分裂。套用我们人类的说法，在繁衍上，它们真没啥好操心的。长大了，条件成熟了，也不用想着找什么对象，自己就裂成了俩。

当然，无性繁殖，后来就变化出了各种不同的形式——比如，孢子生殖、出芽生殖等。这种“复制-分裂”的简单机制好处其实很大，以至于所有的细菌、大部分植物甚至部分动物都具有这种机制（或者至少在某些时候会这么做）。相比有性繁殖，无性繁殖更加有效率，也更为简单。

作为有性繁殖的人类，有时候真的忍不住想说，这事儿吧，真不轻松！你想——如何吸引对方、如何追求配偶，诸如此类的过程增加了多

少不确定性、多少麻烦，甚至很多时候还会有生命危险，生娃不求人简直“色色一一”[(10)]！再打个比方：如果从自私的角度看，没有其他对象参与的繁衍，能完完全全保存自己的遗传信息。而有性繁殖，却只能传一半。虽说孩子是自己生命的延续吧，但毕竟只有一半自己的基因，已经和我大不相同了！

因此必然地，有性繁殖肯定存在着某种优点，最终才得以保存下来并且发扬光大。

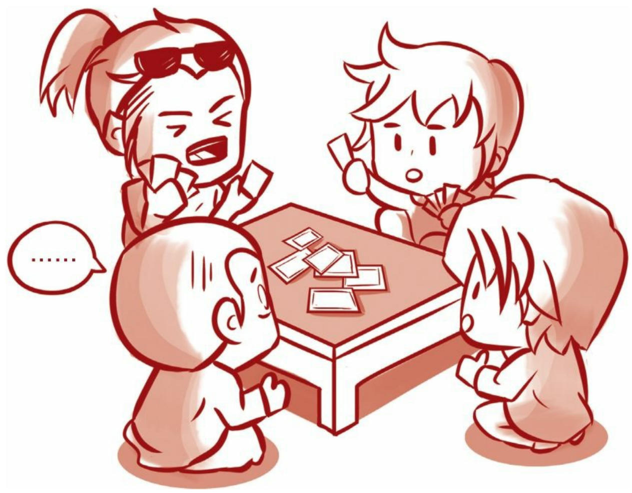
有性繁殖有什么好处？

早在1886年，德国演化生物学家奥古斯特·魏斯曼就提出，有性繁殖能对基因进行重组，创造出“个体差异”，而这正是自然选择起作用的地方。

打个比方，有这样一种一大群人一起玩的扑克游戏：

玩法很简单，每人抽一套牌，每局开始的时候，大家掷骰子，当有人掷出三个六的时候，需要从牌库中抽一张新的，随机替换掉手上的一张牌。赢法千奇百怪，比如比谁的对子多、谁的顺子长，或者谁的三张多等，但每段时间，只能有一种赢牌的方法——于是，我抽到了一副手牌，22、33、44、66、77、99，里面都是各种小对子。

一开始，在大家比谁的对子多的游戏里，我几乎无往不胜；但后来，换了一种游戏玩法——开始比谁的顺子更大，我很快就败下阵来。除非我运气很好，每次开局都能掷出三个六，而且换了几张牌后，刚好把顺子连上，否则必输无疑了……



这个时候，我悄悄找到了同样满手对子的你，对你说：“要不这样，咱们随机对换一半彼此的牌，接着再去比赛。而且，无论谁赢，都算咱俩赢！”

这是不是作弊？

别在意，规则允许！换了一半的牌后，我发现运气不错，手上的牌凑出了一条挺大的顺子，与此同时，还有四张K（虽然在比顺子的游戏里这并没有什么用）。当然，你的牌似乎就不怎么理想了，没有一条顺子，但有个特点，就是出现了777、888、999这样的组合。

虽然你很想把原来的牌换回来，不过我有个更好的主意，要不我们不比顺子比三张吧。如果你有疑惑，可以回顾一下这场牌局的规则——很显然，由于规则的改变，本来并不占优势的你，忽然就赢得了比赛！而如果没有和我换牌的话，新的规则下，你依然必输无疑。好了，现在轮到我继续换规则了，我们比谁有最大的四张吧！这下，赢家肯定是我了。

你是否在疑惑，我说这些有的没的是想说明什么？

想一想，如果不换牌，在第一种规则下，我们各管各的，赢得都很开心；可在接下来的三种规则中，输得都会很惨。而一旦换了牌，在第二种规则下，虽然你依然是一手烂牌，但我的牌却有优势了；第三种规

则下，你忽然逆袭；第四种规则时，又轮到了我再次逆袭。

“牌”就是基因，而“规则”就是环境！

无性繁殖，就好比是守着一套牌打到底的人，虽然每打几轮牌，你有可能从牌库中抽一张牌替换你的手牌，这就是突变。一旦游戏玩法变了，在新规则下，短时期内以你的手牌就几乎没可能再赢了。除非，慢慢地一张张换出一套新的组合，不过这概率和效率都是够低的。

而有性繁殖，则是一群互相换一半手牌的人——当然，他们还有个约定，不管谁赢了，都算是大家的胜利。这样一来，无论游戏规则怎么改变，这些人中，就总会有那么几个的手牌还算不错，可以在游戏中取得优势！

这似乎就是这场游戏的必胜之法。可问题又来了——既然有性繁殖那么能赢，为什么不换牌的无性繁殖还依然存在呢？

前面毕竟是一个比喻——回到现实中，生物的演化可并非打牌那么简单，对局的过程也并非零和游戏。而且，很多时候也并不是换牌和不换牌，也就是无性繁殖生物和有性繁殖生物之间的竞争。对于无性繁殖的生物来说，由于前面的例子中提到的“打若干轮可以重新抽一张牌替换手牌”也就是“突变”这一机制的存在，它们依然有概率适应规则的变化。好比在比顺子的情况下，原本我是5、6、7、8、9、10、J、Q、K，这样的一把大顺子，结果把9换成了一张3，一下就全完了。当然，也有可能反过来，瞬间就逆袭。

所以，突变这事儿也是把“双刃剑”。而像细菌这样的生命，它们还有个重要的生存法宝——繁殖得快。

在有性繁殖的生物换一副牌的时间里，它们可能都玩了成千上万把游戏了。而且第一把游戏它们是一副牌在玩，第二把则是两副几乎相同的，第三把是四副……只要轮数足够多，也足以应付各种可能的新变化了。

但既然这样，那有性繁殖就没有存在的必要了呀？

别忘了，生命在不断地适应着环境，而这环境中也包括了自己的同类——无性别生物个体的众多后代，只能在一处最佳环境中相互竞争生存。环境稍有变化，便不太适应。而有性别的生物的后代，由于基因略有不同，适应的最佳环境也略有不同。因此这些基因略有不同的后代，在各自的最佳环境里处于最佳发展前途，减弱了与自己的同种生物竞争的激烈程度。

换句话说，基因多样性的后代可以增加其同时拥有的生态位(11)数量，避免内耗，从而拥有更广阔的生存环境。

说到底，无性繁殖和有性繁殖各有优势，一个繁衍后代的能力极强，一个繁衍的后代适应不同环境的能力极强。所以，即使当生命变得越来越宏观、越来越复杂，繁殖也变得越来越缓慢和笨重的时候，这两种模式也依然都存在。

比如，对于许多复杂生命的无性繁殖来说，虽然“生一次”周期很长，但一旦开始，就不断地繁殖，比如许多利用孢子进行无性繁殖的生物！巨量的后代中，总有些偶尔突变的版本，可以适应变化的环境。还有一种策略，就是不断地换牌再换牌，无数的新组合中，就可能包含着应对无数种新环境的优势！

你是否好奇，最早的有性繁殖出现在什么时候？

和所有的起源问题一样，可能没法告诉你确切的时间。我只能说：目前最早的有性繁殖的生物的化石证据来自狭带纪（Stenian）的真核细胞，距今12亿～10亿年。

问题又出现了：之前几十亿年都这样“自己搞定一切”地过来了，“自己的宝宝自己生”这样天经地义的事情，怎么就忽然之间非得找个对象合作完成了呢？虽然回过头看，有性繁殖的确优势不少，但从无性繁殖到有性繁殖这个转变，感觉还是来得有些突兀啊？

共生起源学说

很遗憾，虽然生命科学已经取得了长足的进步，但有性繁殖的起源和生命起源一样，依然是一个未解之谜——今天我们也只能提供几个学说供大家参考。首先是“共生起源学说”，这种观点认为，如今我们认为的性关系，最早可能是捕食者与猎物的关系，而且是同类之间的吞食。

是的，那会儿的“爱情”就是这样惊悚！

当然，毕竟是共生，虽然被吃了，但被吃掉的生物体却能在宿主的体内继续存活。而这种关系，最终造就了两个生命的结合。与此同时，它们还用共生解释了线粒体和叶绿体的出现：在十多亿年前，一些大型的吞食细胞吞并了一些原核细胞，后者偶然逃脱了被分解消化的厄运，先是寄生，然后过渡到共生，最后变成了宿主细胞内的细胞器——线粒体和叶绿体。

不过，“共生”却无法解释有性生殖的关键过程——减数分裂是如何起源的。

细胞分裂误记说

而第二种观点，就是先从遗传物质的减数分裂入手，叫作“细胞分裂误记说”。他们认为，最初可能从双核开始，一个细胞在细胞核复制后“忘记”了分开，使它的后代具有了两个核，并进一步地复制以及成双地从一代向下一代遗传；或者可能是，两个细胞，每一个都具有一个单一的细胞核，融合成一个双核细胞。偶尔地，双核细胞又“记得”分开了，这样形成的单核细胞再与不同的单核细胞同伴相结合，就产生了具有两个不同来源的双核细胞。于是乎，一个重要的精炼过程出现了，此时两个双核细胞的单倍体核融合成含有两者染色体的一个单一的二倍体细胞核。

具体过程是这样的：一个单一的二倍体细胞通过染色体进行简单的

两次有丝分裂，产生四个单倍体的单核细胞，这就是所谓的减数分裂。在这一过程中，同源染色体以某种方式紧密地排列，允许同源DNA序列从一条染色体到另一条染色体相互交叉地“交换”，通过交换而重排的染色体就不是原来双亲的染色体，而是或多或少从两者中随机挑选的镶嵌式的染色体，这样形成的单倍体细胞都具有独特的基因组成。

DNA纠错说

现在还有很多学者趋向于认为有性生殖是作为维持基因信息内容之机制的副产品而出现的，是一种保证基因双份拷贝可能性的机制，可能偶尔导致有性状态的产生。如果在校阅之后的某个阶段，双份拷贝各走各的道路，那就将出现作为有性繁殖特征的分离和独立分配的遗传过程。这种说法叫作“DNA纠错说”。

对上文进行一下解释，大概是这个意思：如果某一天，一个无性繁殖的生物获得了一个有害的突变，它可能很难把它甩掉。这个有害突变会一直遗传给它的后代。好比抄写老师写在黑板上的例题，刚好我抄错了几个数字，导致这题怎么也解不出来。如果没有备份，我只能抓瞎。不过，天无绝人之路，班里又不是只有我一个，我还可以问同桌！

由于没有任何正确DNA序列做参考，这些错误将会使任何形式的修补都很难进行——但如果与一个相邻个体结合在一起，核对彼此的基因，或许这样可以通过使错误显露出来的方式解决问题。最终有可能导致这种情况下的每个细胞拥有来自双方的两套染色体，每一个基因都有一个“备份”；如果一个基因出现错误，那么另一个备份的基因就可以很好地发挥作用。

很有可能，这就慢慢变成了后来的有性繁殖。有性生殖都有两份染色体，一个有利的显性基因可以掩盖与之等位的不利的隐性基因，这样，亲代在改变后代的基因时，就会更“保险”一些。这种现象还造成另一种后果，就是有性生殖可以暂时保存不利基因，维持了基因的多样

性。如此一来，当显性基因不再适应环境时，与之等位的隐性基因可以迅速上位。

有一个著名的观察实验。在一个地方的蛾子大部分都是白色的，只有少数是褐色的，因为它们栖息的树干的颜色也是白色的。白色是它们的保护色。后来工厂搬到这个地区，浓烟很快把树干熏成了褐色。再过几年发现这里的蛾子大部分都是褐色的了。控制蛾子体色的基因很可能是一对等位基因。而这种颜色的快速切换（只花了十几代甚至几代的时间）只有有性生殖才能做到，无性生殖是做不到的。相当于前者自带两套答案，一套错了换一套；而后者（无性繁殖）则只能靠"蒙"了。

寄生虫起源说

还有一种挺主流的观点，思路很清奇，认为是寄生虫促使了性的起源。

不是说好的性行为可能传播寄生虫嘛，怎么反过来了？简单来说就是——寄生虫的存在给寿命较长的生物提出了一个大的适应性难题。在这些生物的一生中，寄生虫能繁殖成百上千甚至百万代后代，只要有相同的生存环境，它们就能从一个寄主传播到其他寄主身上。因为无性繁殖的物种群内成员都十分相像，所以寄生物能够轻易地传播，并得以旺盛地繁殖。

可这对寄主来说有什么好处呢？

演化到一定阶段，寄生物就有可能突破寄主的防护机制，威胁到寄主的生存。于是乎，绝大部分的寄主，就被这样干掉了——但有些则不一样，它们通过有性繁殖能产生基因多样化的后代，这对寄生虫来说是相对于原寄主完全不同的生存环境。因此，寄生虫的生长就得以抑制。它们必须适应一个新的环境，而寄主的下一代又产生基因变化，寄生虫的适应过程就又得重新开始。在这场持久的进化之战中，寄生虫和寄主

间展开了一场军备竞争——适应与反适应的相互作用过程。

所以，之前说的环境的变化，其实并不是外部环境，而恰恰是生物体的内部环境。

也许有性繁殖是寄主一个极关键的适应器，能够帮助寄主及其后代对抗寄生虫，有点“红皇后假说”或者“逆水行舟”的意思——在这个世界里，你必须不断地向前奔跑，才能保持原地不动！

由于演化是个大时间尺度的概念，验证这些假说非常困难，所以我们只能以假想实验的方法来验证，或者利用计算机模拟来探索，再或者有人有非常精妙的实验设计，利用繁殖速度快的物种做实验。

但总的来说，起码到目前为止，有性繁殖为何会出现，依旧是个未解之谜！



如何定义性别？既不是看性征，染色体也不是关键

上一节，我们共同探讨了有性繁殖的起源，以及为什么无性繁殖和有性繁殖这两种方式至今依然共存。但依然留下了一个巨大的伏笔——性别的出现，其实是有性繁殖出现后很久以后的事情！

在有性繁殖出现之后，经由不同的路径，生物最终演化出了各种独特的结合方式，其中一种大家最为熟悉的模式，就是雌雄、公母、男女这样的异性繁殖。所以，今天我们就一起去探索这“性别”的起源，而更有意思的部分，则指在“有性繁殖”出现后，涌现出来的各种千奇百怪的“性”。

在探讨“最早的性别究竟是怎么出现的”这一问题之前，我们先得讨论件重要的事：我们如何定义性别？

大约三岁的小朋友就知道，男生有小鸡鸡，而女生没有——这种显而易见的性别差异，我们叫“第一性征”。当然，青春期后，还会出现“第二性征”，比如男性的喉结、女性的乳房等。然而这只是表象，真正的区分又是什么呢？

XY系统与ZW系统

记得中学生物课说过，看性染色体——XX和XY。人类体细胞具有46条（23对）染色体，其中44条（22对）为常染色体，另外两条在性发育中起决定性作用，称为性染色体。目前已知人类有X和Y两种性染色体。女性的两条性染色体大小与形态完全相同，称为X染色体。男性的一条性染色体与女性的X染色体相同，另一条则小得多，称为Y染色体。Y染色体最重要的意义是决定男性性别，除此以外没有其他更重要的作用。还记得生物老师说过，对生男生女有决定作用的是精子而不是卵子。

在生物中，XY这套性染色体系统算是比较流行的——除了人类，几乎全部的哺乳动物，大部分爬行类、两栖类动物，甚至雌雄异株的植物都属于XY型性别决定，比如女娄菜、菠菜、大麻等。

但并非所有的性别都是由“XY系统”决定的。比如鸟类的性染色体——和我们刚好相反，雌性个体具有两条异型的性染色体，雄性个体具

有两条相同的性染色体的类型，称为ZW型，即雌性的性染色体组成为ZW，雄性的性染色体组成为ZZ。所以，对于鸟类来说，生公生母靠的是卵子。比如鳞翅目昆虫（如蝴蝶、蛾子）、某些两栖类及爬行类动物的性别决定都属于这一类型。

除了“XY系统”和“ZW系统”，蝗虫、蟋蟀等直翅目昆虫和蟑螂等少数生物的性别决定就属于X0（零）型。也就是说，一条是X染色体，另一条什么都没有。

在X0系统中，雌性的体细胞中含有两条X染色体；雄性则只含有1条X染色体。比如雌性蝗虫有24条染色体（22+XX），但雄性蝗虫只有23条染色体（22+X）。所以，减数分裂时，雌虫只产生一种X卵子；而雄虫可产生有X和无X染色体的两种精子，这样一来，性别比例依然是1∶1。忽然感觉，雄性蝗虫似乎有那么点不完整。

别急着惊讶，甚至还有更加罕见的类型——在前面提到的普遍采用ZW型的鳞翅目昆虫中，有少数个体，雄性为ZZ，雌性为Z0，就称为Z0型性别决定。你大致可以理解为是X0系统的镜像。

是不是有些惊讶，决定性别的性染色体竟然有四套系统？真实的情况其实还要复杂。

超雌和超雄

回到我们最熟悉的XY染色体系统中——在哺乳动物的性别决定中，X染色体和Y染色体所起作用是不同的。Y染色体的短臂上有一个“睾丸决定”SRY基因，有决定“男性”的强烈作用；而X染色体几乎不起作用。合子中只要有Y就发育成雄性，如果没有则发育成雌性。相信这部分大家很熟悉。

但对于同样拥有X与Y性染色体的果蝇来说，情况就大不相同了——它们的Y染色体只决定它们能不能生育，并不能决定性别。换句话

说：Y染色体上没有决定性别的基因，所以在性别决定中失去了作用。

你或许会猜：起作用的是X染色体？

也不是完全正确，确切地说决定性别的是一个叫作“性指数”的概念，也就是X染色体的条数和常染色体组数之比——性指数0.5为雄性，1为雌性，超过1为超雌。

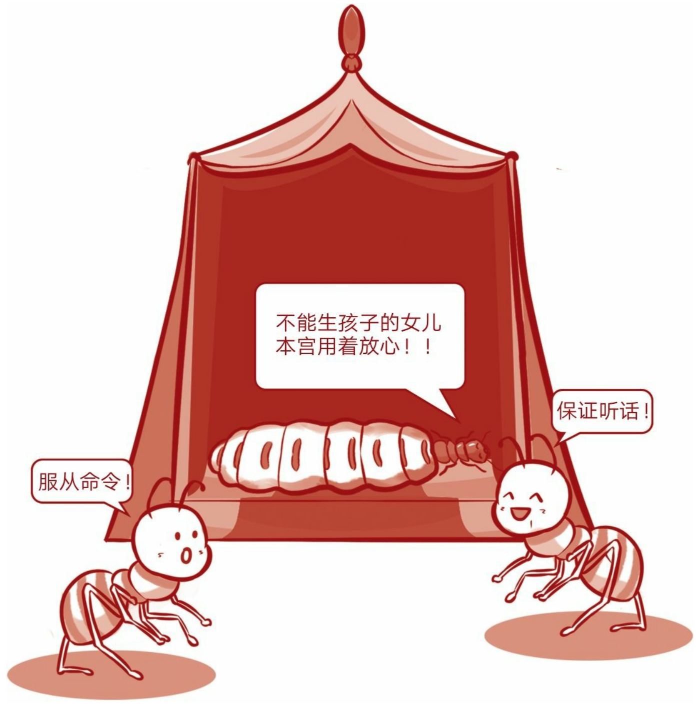
怎么说呢：拥有XY染色体的，会发育成雄性，而因染色体异常形成的性染色体组成为X0或者XYY的果蝇也将发育为雄性；XX是雌性，而拥有XXY的果蝇也会发育为雌性。还有种更特殊的情况，当果蝇的常染色体发生异常的时候，比如三倍体，拥有一条X染色体的个体，“性指数”的比值就是0.333，小于0.5，表现为雄性，实际是超雄……

还没完，性指数其实还有不同的形式——有一种叫作酸模的植物，虽然也有XY染色体，但拥有三种所谓的“性别”类型：雌株、雄株和雌雄同株，它们的性别则取决于X染色体和Y染色体的比值。比如拥有两条X染色体和两条Y染色体的个体，比值是1∶1，就是雌雄同株；XXY的比值是2∶1，则是雌株；XYY的比值是1∶2，就是雄株。

第三性别

蚂蚁和蜜蜂群体中的所谓第三性别——工蚁和工蜂，实际上都是蚁后蜂王的姐妹或女儿，严格来说都是雌性！在蚁巢中，蚁后通过特殊的信息素抑制了工蚁的性成熟；而在蜂巢中，则是通过喂食蜂王浆来唤醒新任蜂后的发育。

更有意思的是，蚂蚁、蜜蜂、胡蜂等膜翅目昆虫，它们其实根本就没有性染色体。区分它们性别的机制与细胞中的染色体的倍数有关——雄性由未受精的卵直接发育而成，所以是“单倍体”；雌性则由受精卵发育而来，是二倍体。这样一来，不但雌性后代如何分工可以控制，生男生女也完全在掌控之中了！



不得不感慨，这些社会性的昆虫才是彻彻底底的“中央集权”呀。对了，大家有没有想过这个问题：单倍体的雄蜂雄蚁，它们的细胞再如何减数分裂变成精子呢？

它们的减数分裂十分特殊，减数分裂第一次，出现单极纺锤体，染色体全部移向一极，产生的两个子细胞中，一个正常，含16个染色体，叫作单价体；另一个是无核的细胞质芽体，一段时间后将退化消失。

在这之后，则是减数第二次分裂，也就是一次普通的有丝分裂了——在前面提到的正常的那个子细胞中，染色单体相互分开，而细胞质则进行不均等分裂，含细胞质多的那部分（含16条染色体）进一步发育成精子，含细胞质少的那部分（其实也含16条染色体）则逐步退化。

所以，雄蜂雄蚁的1个精母细胞，通过这种方式，最终只产生1个精子。精母细胞和精子都是单倍体细胞，这种特殊的减数分裂称为“假减数分裂”。听上去挺折腾的，但好歹也是最终产生的精子。

说得严谨点儿，虽然单倍体和二倍体的性别不同，但决定膜翅目昆虫性别的并不是染色体的倍数，而是由一个基因所控制，叫作CSD（互

补性别因子）[12]，因此，蜜蜂、蚂蚁这种，直接连性染色体都没有了。

温度和性别

听到这儿，是不是已经觉得，要在性染色体层面定义性别，变得没那么简单了？而事实上，在演化之路上和膜翅目昆虫相距十万八千里的爬行动物里的龟鳖目和鳄目，其中包括我们熟悉的乌龟和鳄鱼，也同样没有所谓的性染色体。

它们靠的是温度，确切地说是由卵的孵化温度决定其性别的。比如扬子鳄，人们发现，如果它们把巢穴建于潮湿阴暗的弱光处就会孵化出较多雌鳄；而建于阳光暴晒处，则可孵出较多的雄鳄。具体到温度的数值，鳄类在30℃及以下温度孵化时，全为雌性；在32℃孵化时，雄性约占85%，雌性仅占l5%左右。乌龟卵在20～27℃条件下孵出的个体为雄性，在30～35℃时孵出的个体为雌性。所以，在野外，公母鳄鱼、公母乌龟的数量并不是接近1∶1的。

可这种决定性别的机制有什么好处呢？可惜，一不小心，又踩到一个未解之谜上了。总之，假说很多：有的说“小种群动物雌性较多更利于种群发展”；有的说“一窝幼体性别相同有利于回避近亲繁殖”；也有的说“都能孵化出雌性和雄性的适宜温度条件下，孵化出的幼体活动力强，易被捕食者发现，而超过这个范围孵育出的幼体活动能力弱，更易生存下来”；还有的说“特定温度不仅适合某性别的孵化，更适合该性别幼体的发育成长”……每个假说后面其实也都跟着个“但是”，所以依然有待大家去揭开谜底。

孵化温度也会影响两栖类的性别分化，如蝌蚪在20℃的环境下发育，结果一半为雌性，一半为雄性；若在30℃的环境下发育，则全部发育成雄蛙。还有靠着营养条件的好坏来决定性别的，比如线虫。

线虫动物门是动物界中最大的门之一，只有节肢动物比线虫更多样

化。它们在淡水、海水、陆地上随处可见，不论是个体数或物种数往往都超越其他动物，绝大多数都是自食其力的好孩子，只有少数比如蛔虫、钩虫这种，过着寄生生活。

多数线虫是靠营养条件的好坏来决定性别的，拿大家最熟悉也是最讨厌的蛔虫来举例：它们一般在性别未分化的幼龄期侵入寄主体内，若营养条件差，就会失去1条X染色体，变为雄性染色体组成，发育为雄性成体；若营养条件好，则保留两条X染色体，发育为雌性成体，因此雄性的染色体总数比雌性少1条。

是不是想起了前面提过的X0系统？从表面上看，这种线虫的性别是由营养条件决定的，但从染色体水平看，依然是性指数决定性别。

妈妈的“吻”

不说可能会引起大家不适的动物了，说个我觉得挺温暖的性别决定方式，我管它叫“妈妈的吻”——有一种海生的蠕虫叫螠，其中有一个科叫“叉螠”，长得有点儿像我们俗称的“海肠子”，不过通常说的“海肠子”是另一个科叫“单环刺螠”的物种。

叉螠特别之处就在于——雌虫的身体前端有一分叉的长吻，吻部含有类似激素的化学物质，能影响幼虫的性分化。成熟雌虫将受精卵产于海水中，发育成无性别差异的幼虫，当幼虫落到雌虫吻部时，便发育成雄虫，没有落到雌虫吻部的幼虫则发育成雌虫。若把幼虫从雌虫吻部移去，在海水中生活，则发育成间性个体（也就是不男不女的版本），而且其雄性程度与它在雌虫吻部停留时间长短呈正相关。亲的时间越久，越阳刚！

这个部分，咱们用拟人化的描述，或许听着还挺温馨的；但后半部分，如果用拟人化的方法来描述，那简直是“异形”——恐怖R级片了！

我还是换成科学的表述来介绍：这些即将变成雄性的幼体通过雌体

的吻部后进入雌体的食管，然后进行变态，许多器官退化，最后发育为性成熟的雄体；缺乏吻部及循环系统的它们，只有退化的消化系统，但生殖系统充分发育。所以，它们等于是寄生在了雌体的体内——确切地说，雄体生活在雌体的贮卵器官内，当这些卵排入水中后，雄虫便会施放精子使之受精。

要淡定，这就是千奇百怪的大自然，没有所谓的道德，只有生存和适应。另外，吞进去的也未必都是自己的亲生骨肉嘛，还有很多别人家的孩子，不是吗……

可变的性别

其实叉螠的这种性别决定方式，说白了是受到化学因素的影响，这一点，在植物的性别上也很常见。比如，在黄瓜幼苗期用乙烯进行处理，雌花明显增多；若改用赤霉素处理，则雌花大大减少，而雄花增多。当然，还是要多嘴一句，植物的性激素和人类的，也是差了十万八千里，所以，别信什么吃黄瓜会让孩子早发育，让孕妇流产之类的谣言！

是不是让你想到了“避孕药黄鳝”的流言？说是喂了药可以让黄鳝变性。

黄鳝委屈着呢！有个科学名词，叫作“性逆转”！而黄鳝就是性逆转最典型的例子：从幼鳝到成鳝，通常在两岁前全是雌性的：产过一次卵后（通常是三岁左右）就开始变性了，或者说是雌雄同体，卵巢逐渐退化，精巢逐渐形成；而到了六岁左右，就成了彻彻底底的纯爷们儿，再也变不回妹子了！考虑到通常越老的鱼个头越大，所以特别巨大的黄鳝，一般来说，身长40厘米以上的，那基本都是雄鳝了。

性逆转在鱼类中其实挺常见。再说个经典的，有一种鱼叫作红鲷鱼，大头大眼的，很好吃。在海里，红鲷鱼过着群体生活，一群差不多

二十多条，每个红鲷鱼群体中只有一条雄鱼，是群体的首领，组成一个一夫多妻制家庭。可一旦这条雄鱼不幸死亡，群体中最强壮的一条雌鱼就会变性——鱼鳍变大，体态变粗壮，卵巢消失，长出精巢，最后变为一条雄性红鲷鱼，作为群体的新首领，或者说是雌鱼们的新老公。



有个经典的成语总是被提起——牝鸡司晨。这其实也属于“性逆转”，在鸭子身上则更明显：母鸭有一个发达的卵巢，还有一个很不发达的雄性性腺。如果鸭群中有相当比例的公鸭，公鸭分泌的激素就会抑制母鸭雄性性腺的发育。当鸭群中缺少公鸭时，没有足够的激素抑制母鸭的雄性性腺发育，其中一些身强力壮的母鸭，体内的雄性性腺就会发育起来，产生大量的雄性激素。雄性激素抑制母鸭卵巢的正常功能，使母鸭逐渐变为公鸭。这回倒真的是激素搞的鬼了。性别这东西，在有的生物身上，还真随意。

说起任性的性别，其实对于鱼类来说，真的就是司空见惯的事——珊瑚礁中的石斑鱼。当某一海域里雄性多、雌性少时，一部分雄性石斑鱼就会变成雌性；而当这一海域雌性多、雄性少时，一部分雌性石斑鱼就会变成雄性。更为奇特的是，生活在美国佛罗里达州和巴西沿海的蓝条石斑鱼，一天中可变性好几次。每当黄昏之际，雄性和雌性的蓝条石

斑鱼便发生性变，甚至反复发生5次之多。

我也很好奇，这种超任性性别背后的原因是什么，可惜，依然是未解之谜。说个接受度相对较高的推测——科学家分析，或许是因为鱼的卵子比精子大许多，假如只让雌性产卵，负担太重，代价太高。而假如双方都承担既排精又排卵的任务，繁殖后代的机会或许会更多一些。于是有的鱼儿就采取了这种策略。

性别的定义

读到这里，你还能像开篇时那样，脱口而出“性别的定义”吗？之所以花了那么长的时间告诉大家各种千奇百怪的性别分化方式，就是希望大家能够重新思考，到底什么才是性别的决定性因素。大家先思考着，我继续卖个关子。

回到上一节的主题——有性繁殖的起源。有性繁殖的起源之所以长久以来令人迷惑不解，部分是因为我们在观察今天的世界时，会发现许多无性繁殖的生物依然活跃，与此同时，一些同时具有两种繁殖方式的生物似乎还更偏爱无性繁殖。这样的生物包括酵母、蜗牛、海星和蚜虫等我们称为雌雄同体的生物。

然而，它们其实是根据周围的环境条件来选择繁殖方式——大部分只在环境压力较大时进行有性繁殖，而在其余时间进行无性繁殖。心情好的时候自己就把孩子生了；心情不好的时候，谈个恋爱，然后彼此生下对方的爱情结晶。

说起如何定义性别，既不是看性征，染色体也不是关键。你说把孩子生出来的那个是雌性吧，好像也不对——胎生的或者下蛋的还好说，但大部分水生生物，可都是把精子卵子排到水里面的啊！而且，蜗牛和海星这种雌雄同体的，就更没法说谁是妈谁是爸了呀！

其实，关键就在于不同的配子，也就是“精子”和“卵子”。我们把提

供精子的一方称为“雄性”，而把提供卵子的一方称为“雌性”。

你是不是要拍桌子了：绕了大半天，结果就那么简单？

其实一点儿也不简单，而这正是区分性别的关键。读了上一节，大家应该明白“有性生殖并不一定有性别”。比如，最早出现的有性生殖模式就是“同配生殖”，这些生物生殖时出现了基因的交流和重组，但双方配子的形态大小都一样，也就无法定义性别。而目前进行同配生殖的生物依然很多很多，主要包括一些原生生物、真菌等，而广义上的同配生殖也包括比如草履虫的结合生殖。

没有性别之分，但依然可以找对象换基因。

是不是感觉这种方式很好？每个后代都能够“生女育女”，而且任意两个个体又都可以合作繁衍，这多有效率！可为什么最终我们还是分化出了性别呢？

这又是一个有趣的问题。的确，在“同配生殖”后，又出现了“异配生殖”，也就是交配使双方提供的配子大小不一致了，最终则演变为“精卵生殖”，也就是一方只提供一半的遗传物质，另一方却还要提供下一代发育所需的营养物质，只有到这时，我们才能定义性别。因此，按照自然选择的逻辑，这种方式总有什么独到的地方，最终才得以保留下来并发扬光大。

雌雄的本质差别是对后代投入的差别，雄性对每个后代只提供一套遗传物质，而雌性除了提供一套遗传物质之外，还要提供下一代发育所必需的营养物质。这反映了两种繁育后代的策略。一种是数量型，即雄性产生大量的廉价精子，但有机会遇到卵细胞的精子数目极低。

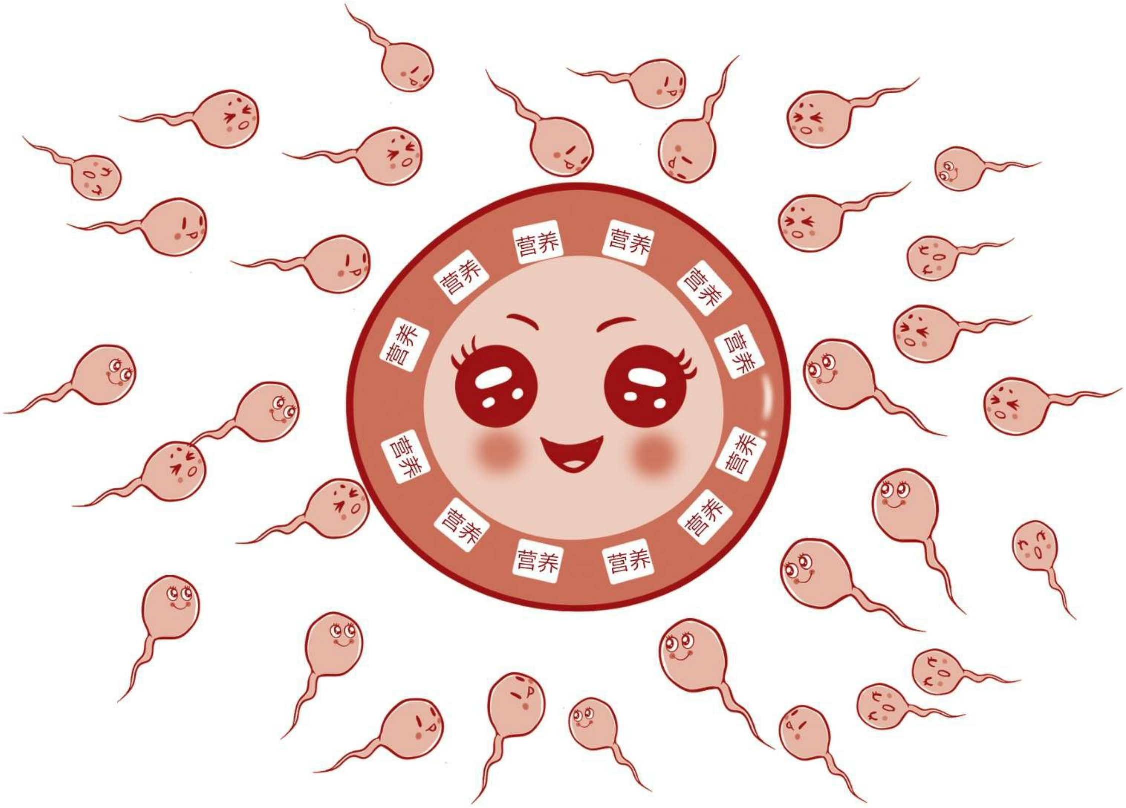
另一种是质量型，产生少量珍贵的卵细胞，但每个卵细胞都有极大机会遇到精子。但这两种策略又是互补的，都能保证自己的遗传物质遗传下去。于是乎，最初可能只是配子间个头的细微差异，逐渐地，个头稍大一点的，和个头稍小却更灵活一些的就逐渐开始了分化。

为什么大部分复杂一些的高等生物最终采用的都是“精卵生殖”这一策略呢？

这就需要考虑古生物的生活环境。精卵生殖进化并成为地球主流时，生物都是海洋生物，交配最大的问题是遇到对方。很显然，一个个体产生大量配子，让配子遇到对方配子的概率比自己遇到自己配偶的概率大多了。把配子直接产在海水里，让配子听天由命，听上去的确省心。

不过这带来了一个矛盾：如果想要后代健康成长，配子必须携带足够的营养物质，而如果想提高遇到对方配子的概率，配子数目必须足够多，而配子数目过多的话又会导致每个配子的营养物质过少。

难以平衡的矛盾出现了！所以，精卵生殖恰好解决了这个难题。不携带任何营养物质的精子数目足够多，导致携带大量营养物质的卵子不必担心难以遇到精子。这个优势最终导致了率先开发出精卵生殖的物种抢占了全球，而现存大多数物种都是它的后代。



精卵生殖，或者说性别最早出现在何时呢？很遗憾，因为目前认为在不同的生物类型中，性别极有可能是分别独立演化出来的，所以很难确定其出现的确切年代。只能说，因为精卵生殖一般在多细胞生物中出现，且一些单细胞生物中也存在精卵生殖，因此性别或许是出现在单细胞向多细胞生物进化的年代中，也就是至少6亿年前吧。

无论是生命的起源，还是性别的起源，每个起源问题都是悬而未决的大坑。好在，科学给了我们一套可以趋近于真相的方法。

处在信息时代的我们，不妨也用信息思维来理解一下生殖这件事。密歇根州立大学的一位计算生物学家克里斯·阿达米有这样一段精彩的解释：所谓信息，就是你需要知道的能够确保生存的东西。演化就是信息保存和信息获取——你知道得越多你就活得越好！

这是一个“学习”的过程。一个生物会不断“学习”到新的信息，特别是在一个变化的环境中，它再将这些信息传递给下一代，帮助它们存活

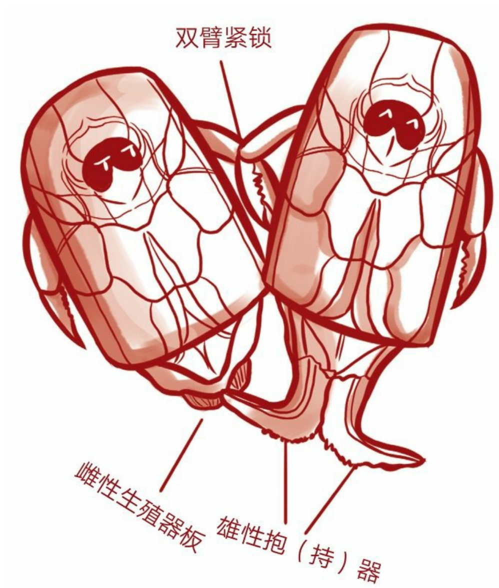
下来。而“性”则提供了一种使物种更加容易“记住”有用信息的方式，从而使这一过程更加高效——有性繁殖涉及选择一位性伴侣，后者本身通过做出正确选择而达到了性成熟状态。

这就是原始版本的“门当户对”，起码结合的两者都是经历过风浪并最终适应当前环境的幸存者！“性”意味着要选择一个好配偶，从而为你的后代选择一个更好的未来。“信息的获取和维持对于演化的奏效是必不可少的——记住旧的并想象未来。”

车速略快——最早的“丁丁”[(13)](13)和各式各样爱的狂欢

友情提示：这一节将会为您展现大自然中多姿多彩的生物繁衍方式，以人类的视角或者道德判断来看，许多内容会显得不可思议，所以请在阅读时保持一颗平常心，了解即可，不要做主观评判。请记住，这就是“真实的大自然”。

最早的“丁丁”



我们知道，如今大部分的鱼类是通过将卵和精子释放到体外进行繁

殖的。但是在3.85亿年前，有一种盾皮鱼纲的原始鱼类，被称作“小肢鱼”。盾皮鱼纲是最早的有颔鱼类，是脊椎动物，在地球存活了近7000万年，在3.6亿年前灭绝。而这种“小肢鱼”之所以有趣，则在于他们的交配方式——在当时的海洋里看来，绝对算得上是非常另类。

化石证据显示，这些鱼是已知最早通过体内受精进行繁殖的脊椎动物，与我们人类一样。而且，它们还是第一个呈现“两性异形”（性二型）的物种，也就是雄性和雌性具有较为明显的不同外形。

科学家分析，在交配时，它们的动作就像在跳舞。小肢鱼的名字来源于它们身上的一对“小肢”，一对呈L形的鳍足，雄性的要明显大许多，在小肢上长有小吸盘。而对化石的细致分析发现，雄鱼的鳍足，交配时会伸进雌鱼的一对小骨之间授精；雌性小肢鱼具有的小吸盘能将雄性的吸盘固定住。研究人员也表示，这一过程看起来更像跳方块舞，面对面贴在一块儿，两条前肢上下挥动。

所以，小肢鱼身上有许多个第一：已知第一种呈现性二型的物种、已知第一种采用体内受精的物种、已知最早的“丁丁”——根据推测，雄性的这对L形的鳍足后来或许就演化成了一些雄性动物的阴茎了（原来是两条，后来合并成了一条）。

海兔生殖链

下面登场的，是一种萌萌的海洋生物——“海兔”！头上有一对像是兔子耳朵的小触角。海兔是一种腹足纲的软体动物，又称海蛞。腹足纲之下有许多我们熟悉的物种，比如蜗牛、鼻涕虫（蛞蝓）、海螺。上次说过，蜗牛是雌雄同体的，海兔也是。

首先，当两只海兔在海中相遇，其中一只海兔为了交配会随对方改变性别，如果对方是汉子它就是妹子。你或许觉得这没啥，毕竟蜗牛也这样。

关键在于，当一串海兔相遇，每一只海兔就会用自己的交接器对前面的海兔授精，同时还接受着后面海兔的精子。也就是说，海兔的生殖是可以连成一串的，所以有一种东西叫“海兔生殖链”。

正因如此，海兔和兔子还有一个共同点，就是同样拥有超强的繁殖能力！

爱的狂欢

说到热闹的交配场面，不得不提生活在加拿大马尼托巴省的一种小蛇：红边束带蛇。它们也有着明显的性二型，成年雌性红边束带蛇在长度和体积上都胜过雄性。而每年从冬眠中苏醒过来之后，它们都会进行一次“爱的狂欢”。

苏醒后，雌性红边束带蛇会释放一种信息素，吸引大量雄性红边束带蛇聚集过来，逐渐形成一个“交配球”。一般，参加这场“狂欢”的蛇会超过3万条。它们彼此裹缠在一起，非常壮观。

但有的时候，雄性红边束带蛇也会释放信息素，组织一场交配狂欢。科学家也不清楚它们的目的。有人认为，雄蛇之所以这么做是为了获得温暖和保护。

一次性的“丁丁”

再来说说很多人爱吃的海参。棘皮动物的海参也是雌雄同体，同时有两种生殖器。在2013年的一期《生物学快报》上，日本科学家称发现了它们特殊的交配行为，它们具有“一次性阴茎”——每次交配完之后，都会脱落自己的阴茎。意思是：用一次，换一根，而且还能再长出来。

没错，海参的再生能力极强。实验的过程是这样的：研究者设置了一个实验池，观测研究了海参31次交配，同时有两种生殖器的它们，交配时的形态类似于数字69，同时用生殖器刺入对方。而当一切结束后，

细长的阴茎仍处于悬空状态[14]。细长的阴茎在交配之后，会突然与身体分离，漂浮在水中。

你会不会担心它们得等好久才能进行下一次交配？其实倒也不算很久——科学家发现：每次交配结束海参会脱落三分之一长度的阴茎，之后会逐渐生长出新的阴茎，达到最新的长度。阴茎的损失和重新生长并不会妨碍海参的正常交配，在实验中它们观测到海参每间隔24小时进行一次交配，连续交配3次。这再生和再战斗的能力，也太强了。

而且，海参的再生能力可不仅仅是再长个“丁丁”那么简单——丢掉内脏团也可以再生，甚至一定条件下海参还可以自己断成两截，各自再生成完整个体。

性寄生

还记得上一节提到的“妈妈之吻”的叉蚴吗？这种现象也有个专门的名词描述，叫“性寄生”，一般表现为雄性个体微小，结构简单，除生殖能力正常外其他生理机能退化，不能独立生活，需要寄生于雌性个体的身体上。有这种行为的生物都活动性差，或是生存于深海中，相亲极难，故而咬定伴侣就不放松了。

这里再介绍一种依附于雌性伴侣生活的动物，叫作鮟鱇鱼。就是头上打个灯笼的那种会“钓鱼”的鱼。鮟鱇目其他鱼类的雄鱼是自由生活的，性寄生的现象出现在了角鮟鱇亚目的成员中，俗称“琵琶鱼”。多年来，科学家一直无法理解为何只发现雌性琵琶鱼。更为怪异的是，所有雌鱼的两侧都长有怪异的肿块。

研究人员发现这些肿块正是寄生雄性琵琶鱼的遗骸。雄性琵琶鱼体形很小，在长到足以进行交配的时候会失去消化系统。

差距这么悬殊，它们是怎么结合到一块儿的呢？刚孵化的幼鱼不论雌雄都生活在海水表面，以浮游生物为食，此时，它们并没有那个经典

的小灯笼结构。等到发育至一定程度，雄鱼就会选择一条合适的雌鱼，咬住它，并且释放一种酶，溶解皮肤组织，进而与雌鱼结合在一起。而雌鱼的组织生长迅速，很快就可以包裹住雄鱼。最终二者在血管水平上融合在一起，雄鱼成为伴侣身体的一部分——雌鱼身上的一个肿块。

通过这种方式，雄鱼的精液进入雌鱼的体内，同时获取雌鱼的营养。然而雌鱼并没有耐心照顾自己身体里的累赘，雄鱼的身体慢慢萎缩，眼睛溶解，接着作为取食部位的下颚完全融入雌鱼皮肤里，最后就剩下一对生殖腺，内藏数以百万计的精子，随时准备在雌鱼排卵时让卵受精。这故事要是拟人化，简直就是“为爱而死，但又成了对方的一部分，永远在一起了”！对于那些没有找到雌鱼的雄鱼，它们会采取另一种方式，那就是变性为雌鱼，等待“另一半”出现。

创伤式交配

为了结合，有不惜真正和对方融为一体的，也有直接刺破对方身体的，有一种“交配”方式叫作“创伤式交配”。

创伤性授精代表物种有捕潮虫蛛、臭虫等。交配时，雄性把尖锐的生殖器刺入雌性腹中，直接把精液喷射到雌性体腔里，而非开放的生殖孔。还有一种蝽（俗称臭屁虫的生物的亲戚），叫非洲蝙蝠蝽，顾名思义，它们寄生于蝙蝠身上，以吸血为生。

它们的交配方式，用我们的眼光看也非常“粗暴”——雄虫的阴茎粗暴地刺穿伯氏器，将潮水般的精子注射到雌虫的淋巴细胞中，精子们穿透卵管壁，进入卵内完成受精。

这种看上去“粗暴”的方式，也是有好处的。对于大部分生物而言，多余的精子通常都浪费了，对不对？但非洲蝙蝠蝽多余的精子则被雌虫淋巴细胞吞噬消解，作为雌虫孕育的营养物质。看上去是在授精，实际上是在提供养分。

对了，它们看到雄性也会这样，目的是使得自己的卵子通过血液途径到达雄性的精囊内，增大自己产生后代的概率。

孤雌生殖

说一下比较特殊的“孤雌生殖”——不靠老公自己搞定。

和无性繁殖不同，孤雌生殖是指卵不经过受精也能发育成正常的新个体的生殖方式，上节提到的膜翅目的蜜蜂、胡蜂、蚂蚁等，其雄性个体的诞生方式实际就是孤雌生殖，不过雌性个体为正常的雌雄两性生殖。但这种情况下，孤雌生殖的后代是单倍体。

还有孤雌生殖出“正常二倍体”的存在——单倍体卵细胞（或极体）和同为单倍体的极体细胞结合从而成为二倍体卵细胞，或减数分裂的第二次分裂不进行，产生一个二倍体卵细胞，最终发育成二倍体后代。许多低等动物如轮虫，甲壳类，昆虫，包括一些蚜虫、竹节虫、粉虱、蚧、蓟马、蝗虫，以及极少数脊椎动物，包括鱼类里的双髻鲨、一些两栖类和爬行类动物比如科莫多巨蜥等，都能这么干。不过大部分物种都只是在某些时候孤雌生殖，未完全脱离两性生殖。

也有完全抛弃了雄性的物种存在——蛭形轮虫等少数生物被认为是彻底抛弃了雄性。现在认为，在大约4000万年前它们演化到无性繁殖阶段，产下的卵全都是雌性后代。哎，祖先废了老半天的劲儿才演化出了有性繁殖，这可好，它们又给还回去了。

你应该还会以为，它们也一并抛弃了有性繁殖本该具备的优点。但有意思的是，它们反而表现出令人惊叹的多样化和适应性，而且生命力之顽强更是让人惊奇——在生命的任何阶段，都能在无水环境下存活数年而不完全脱水，重回水中之后又会复苏，它还特别抗辐射。简直在“打脸”我们这些自以为有性繁殖高级的生物。它们是如何做到这一切的？

要知道，几乎所有其他种类的多细胞动物对外来DNA都有着很强的抵御系统，但是蛭形轮虫却似乎是“来者不拒”的。美国哈佛大学的研究人员分析了它的基因，结果发现，蛭形轮虫可“偷取”其他物种的基因，选取其中有益的、排除有害的，合并变异后形成自己的基因。研究小组在《科学》杂志上发表论文说：“在蛭形轮虫体内，我们发现许多原应属于细菌、真菌甚至植物的基因。”

这个研究结果，非常颠覆当时的主流观点。科学家认为，当蛭形轮虫被迫脱水时，它们会分解原本的遗传物质，让细胞膜破裂，等到它们重回水中时，它们可以重建遗传物质和细胞膜，从附近其他的蛭形轮虫或者其他生物体那里“偷取”部分遗传物质，为己所用。研究者称：“这一令人着迷的生物不仅可以轻松‘穿越’合并其他物体基因的障碍，而且更令人惊奇的是，它甚至可以让一部分外来基因保持功能。”

蛭形轮虫似乎在说：没有雄性，雌性依然可以适应得很好！谁又知道呢？或许随着生物技术的不断发展，性别这一概念，也终究会变成一个过去时吧。

自体受精

有点跑题了，其实和“孤雌生殖”有点类似的，也就是生娃靠自己的还有一种方式，叫“自体受精”。之前在《英国皇家学会会刊B》上公布了一项发现：“一种极小的扁形虫将针头大小的阴茎戳进自己的脑袋，并以这个方法繁殖。”欧洲的生物学家对此大为惊异。

这种扁形虫当然也是雌雄同体的动物。其实，“自体受精”也是无奈之举——在无法找到合适配偶的时候，它身体上长着雄性器官的一端就会弯到长着脑袋的那一端，开展技术上也可以称为“创伤式授精”的活动。接着精子会游到身体中部，并在那里完成授精。之所以要创伤头部，是因为尾部扭转后最容易碰到那里。这虫子一定是权衡了各个选项，也打通了脑筋。



雌性幼态持续

估计大家还是愿意了解那些我们感觉上会正常一点的“两性繁殖”。其实，还有许许多多的特殊方式——有一种现象叫作“雌性幼态持续”。用我们的眼光可以理解为，雌性始终保持着幼年形态，即使到了生儿育女的年纪。

其实，在一些昆虫中就常有雌性幼态持续的现象，也就是雌性不经历完全变态，终身维持幼虫时期的形态。代表物种有介壳虫和捻翅目的昆虫。这些个头极小的昆虫，一般寄生于其他大块头昆虫的体内。雄虫羽化后有一对后翅，前翅退化成了伪平衡棒，不再进食，飞行觅偶。至于雌虫则终身维持着蛆形的幼态，留于寄主体内。

它们要怎么样交配呢？这种模式估计会被“异形”类电影借鉴——交配时，成熟的雌虫会在寄主体壁咬开一个小口，然后将其生殖孔露出与雄虫交配。继而在寄主体内产卵，幼虫孵出后钻出寄主体寻找新寄主。

幼体生殖

以惊人的多样化著称的昆虫，它们的生殖方式也真的是千奇百怪——还有种听上去同样会让人不适的“幼体生殖”。估计你想问：这和前面这种“雌性幼态持续”又有什么区别呢？

首先，幼体生殖的母体在进行生殖时不需要雄体的参加，即卵不与精子结合，因此幼体生殖也可看成孤雌生殖的一种类型。其次，幼体生殖产生的不是卵而都是幼体，因此可以认为这是胎生的一种形式。而

且，它们繁殖后代的时机，其实并没有性成熟，而是在真正意义上的幼体阶段就可以进行生殖，繁殖后代。比如，一些瘿蝇科昆虫——相当于，还在小时候，就把这传宗接代的“虫生大事”给办了。

是不是想想还挺美的？长大后也不着急找对象了，可以到处游山玩水。不过，当你听完了具体的操作方法后，肯定不会再这样想了——它们的幼虫在化蛹之前，体内的卵细胞会开始发生孵化。之后，在母幼虫体内会形成7～30头幼虫。这些幼虫会取食母幼虫的大部分组织，随后，破开母幼虫虫体而外出，又重复进行同样的过程……

“女装大佬”

前面我们提到了许多“性二型”物种，上一节还讲到了“性逆转”，许多是雌性变成了雄性。而在动物界，还有一些“女装大佬”，称为“拟雌现象”。

既然有“女装大佬”的雄性，自然也有正常装扮的雄性。所以这种情况还伴随着另一个说法：“雄性多态性”。举个例子——侧斑鬣蜥：雄性有橙喉、蓝喉、黄喉三种类型，这三种类型是先天基因决定的，而非后天环境和营养条件决定的，体形和攻击力上，橙＞蓝＞黄。

最弱的黄喉，就是“伪娘”吗？黄喉类型的雄性体色的确较接近成年雌性，我们姑且叫作“伪娘”。橙喉雄性是好斗型，它维持较大的领地，和领地内所有雌性交配，还常常侵入别人的领地与其他雄性占有的雌性交配。蓝喉是占有型，领地小，常只有一条雌性配偶，高度警惕，对其严加看管。

黄喉属于投机型，只能靠“偷人”——偷蜥来延续后代。三者构成了一个剪刀石头布的循环：蓝喉虽然警惕性高很少被黄喉“绿”，却打不过橙喉而导致保护自己的雌性被橙喉占有；橙喉虽然常常侵略别人领地，但由于配偶多、精力有限，常常被黄喉钻空子。“伪娘”黄喉的这波操

作，我给个大写的服（说实话，它们就不怕被橙喉给饥不择食了吗？）。

这种情况，在鸟类中也有发生——有种喜欢在湿地生活的鸟“流苏鹬”。雄性流苏鹬也有三种类型，也是由基因决定的。拥有棕色和黑色颈羽的正常型，坚守自己的交配领地。白色颈羽的卫星型，喜欢入侵别人的领地，偷取附近的雌鸟。拟雌型雄鸟最少见，它们利用自己与雌鸟相似的外表来躲过正常型雄鸟的戒备，偷偷与雌鸟进行交配。

充满心机的“爱情”

有扮成“女装”办事的，也有送礼物求爱的。当然，它们不会像我们这样送巧克力啥的，比如蝎蛉、许多蜘蛛、一些翠鸟等，这其实没啥特别，也不能算是心计！但有一些就过分了，比如某些蜘蛛演化出了一种欺骗手段，将一些不那么有价值的食物（吃剩的虫子外壳）用丝包得一层又一层给雌性，雌性慢慢打开的同时，雄性赶紧就把事儿给办了。

还有一个“80后”的童年阴影，动画片《黑猫警长》里的“螳螂新娘”，现在想起来都觉得很可怕——捕食配偶的现象。除了螳螂，不少蜘蛛也有这种情况。不过要注意的是，其实并不是每只雄性螳螂都被吃掉了，没被吃的也挺多的。这也算是《黑猫警长》里的一个小错误了。当然个人始终觉得，不该用人类的价值判断去评价动物的生存方式，无论是评价“螳螂新娘”，还是“一只耳”“吃猫鼠”，都太过狭隘了。

说说占有欲很强的一些雄性动物，比如蜻蜓和豆娘。一些蜻蜓和豆娘的阴茎上有小钩，用于在交配时，将其他雄性的精液掏出，随后再射入自己的，对前任毫不留情！

我们非常熟悉的蜜蜂，也不是省油的灯——雄蜂只能交配一次，而蜂王会和几只甚至十几只雄蜂交配，完事后，雄蜂生殖器会断在蜂王身体上，希望可以防止蜂王再和其他雄蜂交配。不过，演化也使得雄蜂掌

握了去掉前一只雄蜂生殖器的能力，这个看似无用的举动，也从侧面反映了有性繁殖的竞争之激烈。

许多啮齿动物的雄性具有巨大的腺体，在交配结束后分泌胶状物质将阴道堵住，既可以防止精液倒流出来，又可以防止雌性再次交配。

各式各样的“婚配”

再说说动物们的婚配方式吧——我们比较熟悉的有单配制（一夫一妻）和一雄多雌制（一夫多妻）。不过，要说明一下，单配制并不等于厮守终生，以鸟类为例，92%的鸟类实行单配制，然而一夫一妻只是维持整个繁殖期而已，下一年的繁殖期又重新选择伴侣了（包括象征模范夫妻的鸳鸯）。此外，在繁殖期内，双方也未必老老实实相守，常有婚外交配的情况，仅有天鹅、信天翁等极少数鸟类可能终身维持配偶关系。不知道，结了婚的各位，如何看待家里的鸳鸯枕头。

还有种比较罕见的情况——一雌多雄制！代表物种有鸟类中的水雉、彩鹬、三趾鹑等，另外，小丑鱼也算。尤其是彩鹬这种鸟，简直是男版后宫的典型——它们主要活动于海拔较低、植被覆盖较好的湿地，雌鸟大而美丽，雄鸟小，且羽色暗淡。繁殖季节，雌鸟占据一定区域，在区域内追逐雄鸟，追到后，雌鸟依次与不同的雄鸟交配后为它们各产一窝卵，雄鸟独自孵卵、育雏。雄性的彩鹬，还是相妻教子的好爸爸。相比之下，这个雌鸟，哎，不做评价。

鸟类中，还有种更加有意思的婚配制度——鸵鸟采用一夫一妻多妾制，这和古代中国的皇家后宫模式很像。一般来说一只雄鸵鸟的地盘上会有2～7只雌鸵鸟，在繁殖季节雄鸵鸟会尽量和地盘上所有雌鸵鸟交配，但只与一只雌鸟保持夫妻关系（姑且称为夫鸟和妻鸟），其他的雌鸟只能算妾（姑且称为妾鸟）。当雄鸟筑好巢后，妻鸟先产卵，然后是妾鸟。

妻妾之间又有什么区别呢？产完卵后，妾鸟便都跑光了，后面的孵化、育雏由夫鸟和妻鸟共同完成。当然，妻鸟还有本事区分自己产的卵和妾鸟产的卵，孵化时妻鸟会把自己的卵放到受热比较好的位置，确保自己的后代最为强壮，庶出的子女苦啊！

这种机制，对于三方都有什么好处呢？对于雄鸟来说，好处不言而喻——通过这个机制可以和尽量多的雌性繁育出后代。对于妾鸟来说，自己免于孵卵和育雏的责任，自有别人帮自己抚养后代。

是不是觉得妻鸟反而一点好处都捞不着呢？凭啥要耗费大量的时间和精力帮别人抚养后代呢？实际上，鸵鸟的雏鸟是早成雏，也就是说孵化出来后，就会自己觅食，这使得妻鸟带孩子的成本是比较低的。另外，鸵鸟幼鸟的存活率非常低，基本上只有15%的幼鸟会成年，其余的大部分都被捕食者吃了。

通过带其他雌鸟的孩子，妻鸟自己的孩子被捕食的概率就会小得多，尤其是妻鸟自己的孩子本身在亲妈的照顾下就比其他幼鸟强壮得多。看似吃亏，实际为自己的亲骨肉打算得更多。鸵鸟育雏时也有特别之处。当两个带着雏鸟的鸵鸟相遇时，双方会尽量偷窃对方的幼鸟。这恐怕也是基于同一种原因。

爱的“牢笼”

有一种虾叫作“俪虾”，伉俪的俪。它们生活在一种深海的海绵里——这种海绵很漂亮，钙结晶排列得像花篮一样有小小的孔，又名“爱神的花篮”。而在俪虾还小的时候，一只小公虾会带着一只心仪的小母虾结伴从小孔进到这爱神的花篮里面，从此，这对小虾就在海绵中靠浮游生物长大。在这之后，就再也没办法出去了。

总之，此后的一生，这对“俪虾”就在海绵里生儿育女，白头到老！而它们的后代，又将在其他的花篮继续这样“愿得一人心，白首不分

离”的“岁月静好”的一生……这种情节，如果拍成爱情电影的话，应该是个犯罪片吧。

不知道，读完这“车速略快”的一节，你有何感想。想再多唠叨两句：诚然，以人类的眼光来看待，其他生物的繁殖方式总会有这样或那样的“不道德”，似乎只有天鹅这样的婚配方式才是值得称颂的。但这其实是我们一种居高临下、自以为是的批判。对于它们来说，之所以会拥有如今这样的繁殖策略，都是适应环境的结果，并没有是非对错！而事实上，灵长目人科人属的我们，之所以采用如今这样的繁殖模式，也同样是选择的结果。当然除了适应自然，更是在文明逐渐成形后适应社会和经济的结果。

说不定，以动物或者外星人的眼光来看，人类的这种繁殖方式也是够奇葩的呢！

---

(1) 人类起源除了物种演化之谜，还包含智能和意识的起源。

(2) 至于智能和意识的起源，详见本系列丛书《我们为什么这么臭》第四篇第7节《一个终极问题：我是谁？为什么是我？》。

(3) 也叫“无生源说”。

(4) 也叫“生源说”，与自然发生论的“无生源说”相对应。

(5) 这里指的应是蛋白质的进化。

(6) 分别对应了没有臭氧层、紫外线极强的大气环境，以及地球早期频繁的地质活动。

(7) 温度可达400℃，酸性大概等于醋酸，对生命无疑已经十分“酸”了。

(8) 准确地说是氧化还原电位的电势差不够大。

(9) 注意区分，并非病毒。

(10) 沪语方言，同“舒舒服服”。

(11) 指生态系统中每种生物生存所必需的生境最小阈值。

(12) 雌蜂身体内有CSD基因的两个不同副本，分别来自父母，它们能够形成活性蛋白质促使受精卵发育成雌蜂，而未受精的卵子只有来自母亲的一个CSD副本，只能发育成雄蜂。研究人员对处于发育状态的卵的研究表明，在卵排出12个小时后CSD开始产生活性并且在整个发育过程中保持这种活性。利用RNA干扰技术阻碍CSD基因的活性，结果就导致雌卵发育成具有雄性性腺的昆虫，而同样的处理方法对雄卵却并不起作用。因此，如果这个CSD

的活性被干扰了，即使是双倍体的卵，也能变成雄的！

(13) 编者注：这里指阴茎。

(14) 它们的阴茎是端头向后的刺状结构，这种结构可能是用于引诱配偶。

第二章　冰冻解冻又冰封，生命的爆发与灭绝

雪球事件：从最冷的时候开启

第四纪大冰期

要说地球史上最冷的一些时候，《冰河世纪》中描绘的那场始于距今200万～300万年前的“第四纪大冰期”绝对榜上有名。虽然目前普遍的观点认为，它已经于8000～10000年前结束，但也有很多学者认为其一直延续至今。当时，北半球出现了两个面积巨大的大冰盖，也就是“斯堪的纳维亚冰盖”和“北美的劳伦冰盖”。前者的南界曾经到达北纬47°附近，后者甚至达到北纬38°附近。

想象一下，那时候英国伦敦、德国柏林和波兰华沙，以及加拿大全境和整个美国的北部，几乎都和如今的南极大陆一般，是一个极寒的白色世界。在“第四纪大冰期”中最寒冷的时候，全球大陆有32%的面积都被冰川所覆盖，那时候，大量的水以冰的形式聚集在大陆上，这就使得全球的海平面下降了大约130米。当时，整个渤海、黄海以及大部分的东海，都成了陆地。而我国的台湾岛，甚至整个日本群岛，都和欧亚大陆紧紧相连！

真难想象，我们的祖先是怎么熬过这段时间的。或许正是这样严酷的寒冷，促使我们更加重视对于火的使用，对于建筑和衣物等御寒设备的需求，以及发展出了齐心协力配合捕猎的合作技能。毕竟，严寒之后，熬过了这个漫长寒冬的人类，随即开启了文明的春天，古埃及、古巴比伦、中国、古印度，文明之火从此熊熊燃烧！

第四纪大冰期虽然已经足够寒冷，但比起今天的主角，简直可以用温暖来形容——毕竟，那时的地球尚且还有68%的陆地没有被冰川覆盖，生命依然顽强地演变着；毕竟，那时候的赤道附近，还有些许暖如春秋的天堂般的地方；毕竟，虽然海平面要比现在低130米左右，但好歹那时候，还有蔚蓝的大海！而今天我们真正要去的那个时期，整个地球都被冰雪严严实实地覆盖着——如果我们能从当时的太空俯瞰地球的话，这颗我们再熟悉不过的蔚蓝星球会显得十分陌生，甚至可怕！

因为，我们所见的会是一颗几乎遍布着死寂的白色的行星。如果那时候有外星人不远万光年来造访地球的话，估计一定会向母星报告："很遗憾，这颗行星虽然处在宜居带，也有大量的水存在，但似乎并没有生命活动的迹象，也不适合长期居住。我们的探测任务恐怕失败了！"

这就是地球史上一个非常奇怪的时期，称"雪球地球"，也叫"雪球事件"。那时候，地球表面从两极到赤道全部被冰雪覆盖，变成了一个真正的大雪球。

大氧化事件

根据现有的研究分析，这种情况可能出现过两次，一次是在距今24亿～21亿年前，当时一种叫蓝细菌的家伙突然发育出分解水及释放氧气的能力，这就是同样著名的"大氧化事件"。

你或许会想：氧气多了，对生命而言不是好事吗？

的确，氧气在刚刚好的时候，对我们人类这样的生物而言是赖以生存的重要保障。但也不全是这样——在当时，大量的氧气使大气中丰富的温室气体甲烷变得很不稳定。现在推测，或许是这一原因，又或者是其他一些因素产生的叠加效应，经过至少10万年的时间，使全球温度下降到零下50℃。根据估计，当时哪怕是赤道地区的海洋可能也被大约

1.6千米厚的冰层所覆盖。

可别小看微生物了——团结起来，冰封整个地球都可以！这次冰期的正式名称应该是“新元古代大冰期”，又叫休伦大冰期，是由于主要的冰盖证据在休伦湖北岸被发现。



至于另一次，就是我们故事的重点了。在地球解冻14亿年之后，也就是距今大约7亿年前，因为种种原因，地球再一次成了一个巨大的雪球。

故事发生在距今7亿年前。在整个地球的历史中，7亿年前这个当口其实有些尴尬。毕竟，距离地球诞生，已经过去了40亿年，这时候的地球其实早已演化成了一颗成熟的行星。它有了板块构造，有了稳定的大气，有了遍布海洋的简单生命，一切看上去早已井然有序。但对于生命世界而言，它又十分的原始，虽然距离上一次蓝细菌闯过“速冻地球”已经过了14亿年。那么长的时间，生命并没有迎来太多的变化。

14亿年过去了，统治海洋的依然是蓝细菌这样的单细胞动物，它们安静地在海洋中漂浮栖居，再没有掀起太大的风浪，不用说再把地球给冻上了。可为什么，7亿年前雪球又再次出现了呢？这一次，不能再怪那些已经变乖了的蓝细菌了。根据现有的证据，元凶可能是地球自己，或者确切点说是地壳运动导致的大陆漂移。

超级大陆

7亿年前，地球上的各个陆地板块，曾经有过大联合，它的名字叫作罗迪尼亚超大陆，和恐龙时代那次超级大陆总体呈现南北状的分布（详见：第三章第4节）不同，当时的陆地普遍聚集在了地球的中低纬度地区。这就好像是地球缠上了一块超级陆地所组成的腰带。

要知道，那时候的陆地可不像后来那样郁郁葱葱，没有绿树，更没有花香，而是遍布着砂石，光秃秃的一大片。因此，与海洋相比，当时陆地对于阳光的反照率[1]可是要强得多！而低纬度地区，也就是我们如今所说的热带地区，恰恰又是地球接受太阳光最多的区域。



古陆核：地壳在其发展历史上长期稳定的大地构造单元。

7亿年前，大陆漂移成了那副“腰带”模样就导致了一个直接的后果——单位时间内整个地球系统获得的太阳能变少了，这可算是将地球推向极寒深渊前倒下的第一张“多米诺骨牌”。用财经节目的套路来分析，

就是一个公司的“净收入”减少了。

其实对于当时的地球来说，问题不仅仅出在了净收入减少上，它管理既有资产的能力也出现了“系统性风险”。对于保暖而言，能晒足够多的太阳是一回事，穿什么颜色的衣服去晒太阳也是一回事，而衣服本身能否保温又是一回事。

对于地球来说，维持地表温度，主要得靠“温室气体”——这些气体都是拥有偶极矩的红外活性分子，能吸收红外线，保存红外热能。换句话说，它们能在大气中吸收地面反射的太阳辐射，并重新发射辐射。在24亿年前，地球保温，靠的主要是甲烷；而在“大氧化事件”之后，靠的主要是二氧化碳。

你是不是在困惑：地球围个“反光腰带”，怎么还会让“衣服”不保暖了呢？这就得把整个气象系统或者叫“水循环”对地表的影响考虑进去了。想一想，如今的地球，什么地方下雨会更频繁一些？

低纬度地区的降水相对更加活跃，气候也更加潮湿，对于这里的岩石来说，也就更容易被雨水侵蚀。大量陆地在低纬度聚集，这就使得大陆岩石圈的风化作用空前活跃。随便举几个化学式：

$CO_2 + H_2O=H_2CO_3$

（二氧化碳+水=碳酸）

$H_2CO_3 + CaCO_3 = Ca（HCO_3）_2$

（碳酸+碳酸钙=碳酸氢钙）

$Mg_2SiO_4 + 4CO_2 + 4H_2O = 2Mg_2^+ + 4HCO_3^- + 4H_4SiO_4$

（镁橄榄石+二氧化碳+水=溶液中的镁及重碳酸盐离子+溶液中的硅酸）

很明显地看到，在风化作用中，大气中的O_2、 CO_2、 H2O等成分会被大量消耗，并随着生成物进入岩石圈，退出大气循环。对地球而言，这就是个“系统性风险”。大气中诸如二氧化碳这样的温室气体减少了，温室效应自然就随之减弱了。就好比一家公司的财务管理出了问题，收入越来越少，支出却越来越大——这是要倒闭的。

可想而知，对于当时的地球来说，温度就开始一发而不可收拾万年复万年地下降起来。

雪上加霜

还有一个假说认为，超级大陆的一次分裂更加剧了这种作用。因为一次著名的“超级地幔柱”火山活动，超级大陆分裂成几个小的陆地。试想一下，假如我们把一张纸撕成好几片，虽然总面积没有发生什么变化，但这些纸片的总边长却会成倍地增加！

这又和降温有什么关系？你想，如果把纸换成大陆的话，这样一来，陆地的海岸线是不是就会增加很多？而海岸线的增加会带来两个后果：一个是微生物在岸边的活动增加，光合作用的加强导致大量二氧化碳被吸收并转化为有机体最终埋藏于地下；另一个是比起雨水侵蚀来说，海水直接和岸边的岩石接触，就会更快地风化侵蚀硅酸盐，进而又消耗了不少二氧化碳。

再想想，温度越来越低之后，地球上的什么东西会越来越多？

冰！当然确切点，应该是冰川。在这一过程中，盘踞于南北两极的冰川开始一点点地扩张起它们的势力范围。这里我们先回到前面举的一个例子：你想想，如果有三张材质相同的纸，一张白色、一张黄色、一张蓝色，同时放在阳光下晒，一段时间后哪一张温度最低？

冰川越来越多，这就使得地球上原本吸热能力更强的蔚蓝的海水也在减少。而且，比起陆地来说，冰川的反照率更高！

这一块“骨牌”倒下，事情已经开始无法挽回了。说到反射太阳光，谁能跟冰雪相比？另外，当水体逐渐结冰，蒸发也会越来越少，大气中能够维持温度的湿润水汽也开始进一步减少。随着反照率的激增和蒸发率的骤减，这时候的地球已经正式开始了“冰室效应”，而且一环扣着一环……要是地球是家上市公司的话，股价应该是断崖式下跌了。

如果平均气温就是它的股价的话，基本上不跌到退市是不会回头了。有环境学家进行过这方面的模拟，当冰盖推进到南北纬30°左右的时候，全球冻结将成为不可逆转的结局。也就是说，从这时起，地球将必然成为一个大雪球！

全球冰冻，对于生命而言无疑是巨大的毁灭性的灾难。它们又是如何熬过来的呢？有一些观点推测，或许是在厚厚的冰层之下。因为海底地壳运动的缘故，还是会有些许温暖的海水存在，比如在深海的地热口附近，而当时的生命可能就是在那里苟延残喘着。

甚至也有一些观点认为，一些生命体可能会用类似于芽孢或孢子休眠的形式，保存生命的种子；在一些低纬度的冰缘导风地区，火山作用和阳光辐射则可能会在白天融化部分的冰，产生临时的水洼，冰层之下类似于矿物质代谢的生态系统，也可以提供一些相对不错的避风港；当然，在冰盖下也依然可能存在着类似如今科学家在南极洲找到的，沃斯托克湖那样的液态水坑，这是在冰层之下的水坑。

总之，在这个似乎永远看不到春天的永冬世界，虽然说可供选择的地方并不多，但生命依然顽强地活了下来。

春天在哪里？

现在看来，生命真的就是永远盼不到春天了。这一切，似乎是一个完美的闭环，一个寒冷的死循环。但反观我们现在所处的生机盎然的世界，我们又清楚明白故事的最终结局，那就是，雪球终有融化的一天。

可是原因到底是什么呢？会不会是太阳突然变得很热很热了？还是来了次惊天地泣鬼神的天地大冲撞，掉下颗小行星之类的？成年之后的太阳其实总体还是稳定的，虽然会有些许的波动，但并不足以释放出能逆转“雪球地球”的能量；至于小行星撞地球，目前也并未找到这样的证据。或许——挽救地球这家公司的救星，不是别人，正是地球自己！

虽然几乎没法再吸收太阳的热能了，但在冰冷的外表下，地球依然有颗火热的内心！沉寂久了，难免也会有躁动的时候，而这种躁动，就是我们人类所称的火山的作用。

导致这场灾难的最初起因是地壳运动，给生命以最后温暖港湾的也是地壳运动，没想到终结这场灾难的还是地壳运动。正所谓“冰也地壳，化也地壳”——虽然在后来，一次超级大的火山爆发曾经在二叠纪末制造过一次可怕的大灭绝（详见第二章第2节），但在此时，火山则扮演着救星的角色。



并不是想当然的，剧烈的火山爆发把冰给融化了——毫无疑问，熔

岩的温度的确足以融化局部的冰雪，但是对于整个“雪球地球”来说，这点热又太微不足道了。真正改变这一切的，是火山输出的大量的温室气体。

别忘了地球本身也是一个更加庞大的循环系统，虽然我们前面提到，温室气体被逐渐封进了岩石圈里，但岩石还要在板块构造的循环中被带回地幔里。当岩石的枷锁融化为流动的岩浆，气体也重获了自由。随后，只要等到火山作用打开重归地表的通道，这些原本溶于岩浆的挥发性成分，便会随着汹涌的热流一起回到久违的大气层。

有意思的是，“雪球时期”由于大量冰盖的影响，全球的岩石风化率反而进入了一个历史性的低位，先前地表温室气体的消耗因素几乎触底。这个时候，火山作用导致的温室气体输入就显得更加突出了。火山持续不断地向大气输送着温室气体，这就使得大气中的温室气体越聚越多，而当它们的比例重新恢复到“足以封存住阳光的热能”，平均温度就能够重回冰点之上。

这个时候，我们的“大雪球”也就开始渐渐融化了。当蔚蓝色再次出现于这颗星球的表面，真正的春天也就不远了。后面的事情我们就都知道了，在这之后生命迎来了真正的春天：根据目前的研究推测，雪球事件结束于5.5亿年前，而在不久之后，也就是一千多万年之后，壮观的寒武纪生命大爆发也就正式开始了。

延展阅读

另一个版本的解冻原因

一些比较新的研究显示，拯救地球于冰雪之中的，除了我们上面提到的地壳运动之外，或许还有地球自转轴存在的周期性的缓慢摆动，这最终造成了有规律的冰层解冻。

有研究团队制作了一个复杂的气候模型，用于测试那一时期大约是两万年周期的地轴摆动所产生的影响（岁差）。气候模型和岩石沉积层的记录都表明，地球旋转轴轻微摆动，导致地球表面的不同区域热量接受产生差异，虽然说这种变化非常小，在人类看来也相当漫长，可对于地球来说，这种摆动所造成的区域受热差异已经可以用“按摩”来形容了。所以，就有科学家推测：或许正因为此，最终，看似坚不可摧的寒冰结界出现了松动，从而启动了整颗星球回暖的进程。毕竟地球的气候或多或少都受到天体运动的影响。

泥球地球

既然都没有定论，那就一定会有反对的声音。《科学》杂志上就有篇文章指出，仅仅凭借着一个冰封的赤道，科学家无法确定当时地球上冰雪覆盖的具体程度，地球既有可能一直处于完全的深度冰冻状态，也有可能只是受制于不断活动的冰川和冰山的影响，还有可能是介于两者之间的状态，也就是所谓的半融雪球状态。事实上它还提出，连“雪球地球”这样的一个名称，可能同样需要重新考虑，它说地球可能并不是一个白球，而更有可能是一个泥球。

由于向外喷射灰烬的火山会经常爆发，这就可能使得地球洁白的表面布满灰尘，所以从这一点来说，好像也能够解释我们前面提到的融化的问题。试想一下，覆盖在冰盖表面的深色火山灰，是不是一定会比冰盖本身更好地吸收来自太阳的热能呢？

岩石的记忆

你是否好奇，我们是如何推断出地球曾经经历过这样的大冰冻时期的呢？我们之所以能够穿越时空了解那么多地球的往事，靠的都是岩石。大陆漂移在这颗星球上延续了数十亿年，而如今的科学家已经有了一套完善的方式，来揭示出大陆上的每一块沉积岩形成于何时何地以及

何种环境，并且以此来还原大陆漂移和环境变迁的历史。

确定地层形成的年代，科学家可以利用地层层序率和同位素断代，前者就是地层奶油蛋糕的比喻：先形成的岩层通常位于下面。至于7亿多年前的时期，科学家主要会用到的是铀235（半衰期约7.1亿年）和铀238（半衰期约45亿年）。

确定岩石当时所处的位置，可以利用矿物的磁性——利用在沉积岩中含磁矿晶的排列方位，科学家就能够还原出当时大陆所处的纬度。要知道岩石往往并不纯粹，通常是含有多种矿物成分的，其中或多或少就会含有一些铁磁性矿物，比如说火成岩，当岩浆温度降到其中所含的铁磁性矿物的居里点以下时，这些矿物就会被当时当地的地磁场磁化，从而使岩石获得磁性。

温度继续降到常温以后，一部分磁性就被保留了下来，而同一时期生成的岩石（不管它处在地球上的哪一部分）所获得的磁性，都是由当时的地磁场所决定的，彼此相互关联，而且具有全球一致性。这样一来我们就好比是获得了古代地貌拼图的一个重要的辅助线。再通过一些方法就不难确定这一岩层当时所处的具体纬度了。

通过研究岩石的结构和构造，我们还能推断出沉积物生成时的环境；至于地层与地层之间的叠置关系，更是记录着环境的演化和变迁。如此一来，推理出当时到底发生了什么，也就有据可循了。

当科学家研究那些距今7亿年前后形成的地层时，发现这其中基本上都残留着一类特别且稀有的岩石类型，这是一种只有在经历大冰冻和大溶解之后，才会出现的稀有的岩石品种——冰碛岩。

冰川通常质量巨大，它的搬运能力也非常强，对周围岩石具有很强的剥蚀作用，它就像一把大刨刀一样刨着山地。随着冰川体的运动，这些剥蚀产物也会被冰川裹着或者推动着向前移动。由于冻结在冰川中的岩石碎块不能够自由地移动，所以彼此之间极少摩擦与撞击，因此，岩

屑的棱角很少磨损。

冰碛物常常是巨大的石块、黏土和砂粒混合在一起的。当冰川开始融化时，它便把所携带的物质给沉积下来。换句话说，在外力地质作用中，除了冰川之外，大概没有什么样的外力能够如此偶然地，把完全不属于一个水动力量级的，甚至来源也截然不同的沉积物，放置到正常情况下完全不该它出现的环境里。

这样一来，科学家便可以通过地磁法进行古纬度还原，去推测这些碎屑在被冰川剥离前，分布在怎样的纬度了。

1964年，剑桥大学的地质学家哈兰德（B.W.Harland）最早对全球范围内新元古代，也就是8亿～5.5亿年前的冰期沉积物进行研究。他发现，在全世界各个大洲都有这种8亿～5.5亿年前的冰期沉积物。通过简单的地磁学分析，他指出，当时这些大洲，并没有像现在那样被海洋分开，而是在赤道附近会聚成一整块巨大的大陆。

很可惜，由于分析手段的缺乏和数据有限，加上板块漂移在当时还算是比较前卫的假说，所以，哈兰德的说法并没有得到广泛的证实。人们更不明白这种沉积物为什么会出现在赤道附近。我国老一辈的地质学家，也注意到了出现在这一时期的冰川沉积物。比如中国科学院地质研究所的研究员刘鸿允，就曾建议将这一冰碛事件称为“南华大冰期”。

1987年，加州理工的古地磁学家科石温克（J.L.Kirschvink）等人研究了澳大利亚一块新元古代的粉砂岩。沉积学研究表明，它是在浅海环境下沉积形成的；而地磁学研究则表明，这块岩石居然最早产生于赤道附近——要知道，这块石头是从一套距今6亿～8亿年前的杂砾岩[2]中获得的，这些杂砾岩夹有大小不等的砾石，而砾石上还有明显的被摩擦的痕迹，这被认为是经历了冰川搬运的结果。

这个看起来不可思议的研究成果，又被后来的研究检测所反复证实。距今7亿年前后的这些地层当中，冰碛岩几乎覆盖了从极地到赤道

的整个地球！

后来，科石温克甚至还首先提出，在新元古代曾出现过几次“雪球地球”事件——也就是说在大约2.5亿年的时间里，地球或许经历过反反复复的封冻到融化的过程。

为何雪球从此不再来？

虽然，“雪球地球”之后的5.5亿年间，地球的确又经历过若干次大大小小的冰期，但是“雪球地球”这样规模的全球冰冻，却再也没有出现过。至于为什么，这个问题我倒想留给大家和我一起来思考。

未来是否还可能再次出现？一切还真不好说。有科学家推测：在2.5亿～4亿年后，大西洋可能会彻底消失，而地球会再次形成一个超级大陆，也叫究极盘古大陆（详见终章）。谁也说不准，究极盘古是否会再次变得像我们今天提到的那条腰带那样——在中低纬度地区分布，而这是否会再次成为雪球事件的第一块多米诺骨牌，就更不得而知了。

另一个因素则可以让我们有些许安慰，毕竟太阳正在衰老，随着它的质量逐渐减少，它会渐渐膨胀，这样一来，地球所能接收到的热量也会比7亿年前多不少。

当然了，我们更不要忘了——地球这个复杂的大系统，是以一种“不可思议又千丝万缕的联系”维持着“看似牢固却又十分脆弱的平衡”，而如今由人类活动造成的地质变化规模，已经足够列入国际年代地层表当中了[(3)]。这里就带来了一个老生常谈的问题，我们是否会成为导致“雪球地球”又或是“火球地球”的第一块多米诺骨牌呢？

不过，地球母亲可能并不需要我们的拯救。即使“雪球地球”或“火球地球”出现了，对于地球本身或者是地球生命整体而言，它可能并算不了什么太大的事。毕竟，这样的大灾难，生命经历多了。它们应该也会像亿万年前的远古祖先那样，找到合适的方法得以幸存（详见第二章

第2节）。

可对于人类来说，一切就说不好了吧？

浩劫与重生：寒武纪生命大爆发

在最后一次“雪球”事件的冰川消解后不久，按照“加速宇宙历”的话，大约过了一“天”多，在“12月17日的21：00”，迎来了寒武纪生命大爆发（详见：番外章倒数第2节）。

比尔·布莱森在《万物简史》中描述：

把地球的45亿多年的历史压缩成普通的一天，那么生命的起始很早。出现第一批最简单的单细胞生物，大约是在上午4点，但在此后的16个小时里，没有取得多大进展。直到晚上差不多8点30分，这一天已经过去5/6的时候，地球才向宇宙拿出点成绩，但也不过是一层静不下来的微生物，然后终于出现了一批海生植物。20分钟以后，又出现了第一批水母以及原始的腔肠动物、环节动物、节肢动物。晚上9点04分，三叶虫登场了。快到10点钟的时候，植物开始出现在大地上。过不了多久，在这一天还剩下不足两个小时的时候，第一批陆生动物接着出现了。由于10分钟左右的好天气，到了10点24分，地球上已经覆盖着石炭纪的大森林，它们的残留物变成了我们的煤。第一批有翼的昆虫亮了相。晚上11点刚过，恐龙迈着缓慢的脚步登上了舞台，支配世界达三刻钟左右。午夜前20分钟，它们消失了，哺乳动物的时代开始了。人类在午夜前1分17秒出现。按照这个比例，我们全部有记录的历史不过几秒钟长，一个人的一生仅仅是一刹那的工夫。

正是这段动人的文字，给了本书灵感。相信你应该注意到了，生命从简单到复杂，其实经历了漫长的演化。在寒武纪（距今约5.7亿年）之前，生命的发展处在一种非常缓慢的状态。但从寒武纪开始，生命的

形态和样貌忽然变得丰富了起来。

在两千多万年时间内，各种各样的动物迅速起源和出现。节肢、腕足、蠕形、海绵、脊索动物等一系列与现代动物形态基本相同的动物在地球上来了个“集体亮相”，形成了多种门类动物同时存在的繁荣景象。

也是从寒武纪开始，另一个恐怖的阴影始终伴随着生命的发展，那就是“大灭绝事件”。接下来将带大家回顾的，便是地球生命演化史上的数次“浩劫与重生”。

寒武纪

和大家比较熟悉的侏罗纪、白垩纪一样，寒武纪也是一个地质年代。不过，时间上要比恐龙时代早很多。恐龙生活在中生代，而寒武纪是古生代的第一个纪。不仅如此，寒武纪更是“显生宙”的开始，在此之前的地质时期是“隐生宙”[(4)]。你可以顾名思义——隐生宙底层中的生命通常“隐”秘难寻，但显生宙底层里的生命就“显”而易见了。



寒武纪（Cambrian）是源自英国威尔士的一个古地名的拉丁语，后来被日本人音译，之后再被中国所沿用。1936年，亚当·赛德维克（Adam Sedgwick）在英国西部的威尔士一带进行研究，因为在罗马人统治的时代，北威尔士山曾叫作寒武山，所以，赛奇维克就把他所研究的这个地质时期称作寒武纪。

古生物学和地质学史上的一大悬案，就是寒武纪的“生命大爆发”。在这个时期，生命好像是忽然之间爆发出来的。从达尔文开始，一直困扰着学术界的谜题之一就是“为何在寒武纪会出现生命大爆发”。整个寒武纪是非常丰富多彩的，这个时期持续了大约5370万年。要注意，这些丰富的生命形态都是生活在海洋中的（详见第四章第1节）。

奥陶纪

寒武纪之后，就到了奥陶纪（Ordovician）。这也是一个日本人音译后，中国人沿用的音译词。奥陶一词是由英国地质学家查尔斯·拉普沃思（Charles Lapworth）在1879年提出的，它代表了露出于英国阿雷尼格山脉（Arenig）向东穿过北威尔士的岩层。

从地质角度来说，每一个纪代表着岩层的一层。有点像是奶油蛋糕——“柠檬蛋糕”的这一层代表着奥陶纪，下面垫着的一层“巧克力酱”代表着寒武纪。这个岩层发现的地区是古代奥陶部族的居住地，奥陶纪也因而得名。

奥陶纪时期，气候非常温暖。海平面上升，地球上的绝大部分地区几乎都被水覆盖。陆地和海洋交界的地区由此就形成了大片大片的浅海，这些地方就成了海洋动物的天堂。因为浅海相对来说风平浪静，也比较温暖宜人。所以，海洋无脊椎动物在这个时候是空前繁荣的。

这一时期，像鹦鹉螺、三叶虫之类的生物遍布海洋。要注意，这时候海里的生物大部分都是没有脊椎的。什么是无脊椎动物？比如海螺、螃蟹这样的物种，就是没有脊椎的。不过，当时的海里，并没有螃蟹，更多的是像三叶虫这样的甲壳类动物。虽然无脊椎动物统治着海洋，但早期的鱼类也已经开始出现了，有一些甚至已经到了淡水里生活（详见第二章第3节）。

不过，在温暖宜人的奥陶纪末期，由于当时地球气候忽然变冷，海

平面迅速下降，这就导致了地球历史上的第一次生物大灭绝。

第一次生物大灭绝

大约在4.4亿年前，如今撒哈拉沙漠所在的地区曾位于当时地球的南极。研究也显示，当陆地汇集在极点附近的时候，就容易形成非常厚的积冰，奥陶纪正是如此。于是，大量的冰川使洋流和大气环流变冷，整个地球的温度就下降了。

冰川把水给锁住了，海平面就跟着降低，很多在浅海的动物可能就被困住了。随着海水蒸发殆尽，这些浅海生物也就一并归了西，还有一些则随着温度的下降直接被冻死。往复几次，就导致原先非常丰富的沿海生态系统被破坏，最终使生活在浅海地区的生物失去了赖以生存的家园，走向了灭亡。这次事件导致了当时85%的物种全部灭绝。

泥盆纪

奥陶纪之后，是志留纪（Silurian），志留纪仅仅延续了2500万年。许多物种在经历奥陶纪末灭绝事件后，进入一个新的复苏阶段。对生命而言，这一时期的一个重要事件是植物的登陆（详见第二章第3节）。

再之后则迎来了一个非常重要的地质年代，叫作泥盆纪（Devonian）。听到这个名字，很多人会猜测大地全都是泥，生物全都是像泥鳅一样的，其实不是这样。和之前的寒武纪、奥陶纪一样，“泥盆”这两个字也是来自日语的音译。

泥盆纪的命名地是英国的德文郡（Devon）。在日语中，泥的读音为“de”（デ），盆的读音是“bon”（ボン）[(5)]。所以日本人就用“泥盆”来音译英文Devon。中国近代的地质研究受日本的影响很大，因而出现了不少类似的“二次进口”译名。

刚刚我们提到的奥陶纪大灭绝事件当中就有一类海洋生物——鱼类

逃过了劫难。不过，在奥陶纪的海洋中，鱼类并不是主角。在当时，它们属于比较低端的、不起眼的生物，躲在一些角落，不敢见世面。但那一次大灭绝消灭了当时许多的海洋霸主，这就给鱼的发展留下空间。

山中无老虎，猴子称霸王。鱼和我们一样，都是脊椎动物。经历了志留纪的复苏，到了泥盆纪，整个脊椎动物迎来了飞跃式的发展。在当时，鱼儿们已经相当繁盛了。因此，整个泥盆纪也被称为“鱼类的时代”。

在这个时候还出现了一种鱼类，长着四条像腿一样的鳍，那就是两栖类和爬行类的祖先：四足类。这些动物最初还是像鱼一样，只是说它有四个小脚，已经有点像准备上岸了。这些动物在这个时期，正准备着向陆地进发。

整个泥盆纪，气候更加温暖，非常宜人。所以，生物再次迎来了大繁荣大发展的时代。那些志留纪登陆的植物，到了此时已经日渐繁盛，昆虫也随之登陆。地球上的陆地终于开始变得生机勃勃（详见第二章第3节）。

第二次物种大灭绝

估计这些早期登陆的植物怎么也不会想到，自己竟然引发了第二次物种大灭绝。

当时，整个陆地的气候环境，对刚刚上岸的植物来说绝对是天堂——空气当中弥漫着植物最喜欢的二氧化碳。光合作用的原理大家应该都明白，植物的生长是需要消耗大量二氧化碳的。可想而知，作为陆地的先行者，没有其他竞争者的植物可以肆意地生长，晒晒日光浴，尽情享用着已经积攒了亿万年的二氧化碳。

不过，各位也别羡慕得太早，可持续发展的道理大家应该都明白——植物的过度生长，消耗了太多的二氧化碳，也向大气中释放了过多

的氧气。类似于当年的“大氧化事件”（详见第二章第1节），全球又一次出现了“大降温”。

二氧化碳是一种温室气体，如果在空气当中的含量过少，就会带来这样的结果。如今我们为了防止全球变暖而种树，就是一个逆向的方法。二氧化碳少了，结果全球变冷了，海平面下降。和上次一样，很多浅海生物被冻死、干死。只是诱因不太一样，这一次的诱因是植物多了，二氧化碳给吸光了。

这是一方面，但是另一方面还是和植物有关，大量的植物也改变了土壤的成分。植物也是一代一代会堆肥，使得土壤变得充满了养分。这一些营养盐被冲刷到海里之后，就使得海里的藻类大量生长。对藻类来说是挺好的，但对于其他的海洋生物就未必了，因为这些疯长的藻类会大量吸收水中的氧气。

因此，超过半数的海洋生物便在这种缺氧的环境中窒息而死。这次大灭绝，也被称为晚泥盆纪大灭绝（距今约3.65亿年）。第二次物种大灭绝呈现出两个高峰，中间间隔了大约100万年。虽然罪魁祸首是陆生植物，但遭殃的却是海洋生物——大约有82%的海洋物种灭绝了。陆地上的植物却没什么大碍，由此更引出了接下来的“石炭纪”。

石炭纪和二叠纪

凡事有利有弊，一个物种倒下了，更多的物种又站起来了——换句话说，大灭绝往往会给幸存的物种留下巨大生存空间。前面说到：水中的含氧量下降，结果憋死了很多海洋生物；在陆地上，却因为植物的光合作用产生了大量的氧气。

水里没氧了，陆地上氧增多了。于是，在世界上的某个角落，那些我们前面提到的四足类的鱼，演化出了肺。凭借着这种半陆半水的生活方式，它们成功逃过了此劫（详见第二章第3节）。此后的1亿多年，这

些生物最终进化成了两栖动物和羊膜动物（详见第三章第1节），这段时期是石炭纪和二叠纪[6]。

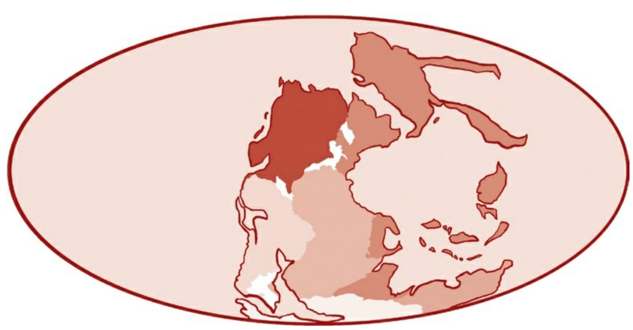
总的来说，这段时间，植物继续在疯长，陆生动物也继续探索着更多的新领地，除了石炭纪末期的一场意外大火使得“巨虫时代”终结以外，一切都是欣欣向荣的。熬过了上次大灭绝的生物，在此期间得以迅速繁衍发展，无论是陆地还是海洋，都出现了许许多多新的生物种类（详见第三章第1节）。

不过，愉快地生活在二叠纪晚期的动植物，万万也没有想到，等待它们的将是地球生命史上最为严重的一次“大灭绝事件”！

第三次生物大灭绝

据估计，当时地球上96%的物种都灭绝了。其中，更有大约95%的海洋生物和70%的陆地脊椎动物全部灭绝。而曾经遍布海洋的三叶虫，也是在这一次灭绝事件当中彻底消失的。相比之下，白垩纪晚期的那次导致了恐龙消失的灭绝事件，简直是小巫见大巫。这次大灭绝，更是直接宣告了自寒武纪开始的延续了近3亿年的古生代的终结。

从原因上看，二叠纪大灭绝和前两次还是有很大不同的。科学家推测的原因包含多个方面：或许是气候突变、沙漠范围扩大、火山爆发等一系列的原因共同造成的。科学家认为，在二叠纪，曾发生过海平面下降和大陆漂移。



二叠纪的海陆分布

当时，所有的大陆逐渐聚集，形成了一个联合的古大陆，所有的大陆基本上堆到了一块[7]。这便使得原本富饶的海岸线急剧减少，整个大陆架也因此缩小，生态系统受到了严重破坏。更严重的是，当浅层大陆架暴露出来后，原先埋藏在海底的有机质被氧化。这个过程便消耗了空气中的氧气，释放出大量二氧化碳。大气中的氧含量因而减少——可想而知，这对已经适应了高氧环境的陆地动物来说，是极为不利的。二氧化碳升高，导致了温室效应——气温随之升高，海平面上升。这又使得许多陆地生物赖以生存的家园被侵蚀。

在那段历史时期，由于不同的板块之间不断地挤压碰撞，地球上“时刻”有火山在活动，甚至还爆发过具有毁灭性的火山喷发事件。数以亿吨的火山气体，也破坏了当时的臭氧层，强烈的紫外线撒向地面和浅海，这也杀死了大量的生物。同时，海底的火山活动配合上阳光的照射也提高了海洋的平均温度——根据估算，当时的全球平均海温可能达到了40℃，这是一个足够用来洗澡的温度了。大规模的火山爆发，还会导致全球范围的酸雨，这也毁掉了陆地生物生存的家园……总之，就是一派末日景象。

前面说过，二叠纪的陆块不断碰撞并最终接壤，从而形成了一个超级大陆。这也导致来自海上的雨水和雾气难以深入内陆地区，内陆地区因而变得非常干燥，形成了一个非常广袤的沙漠，那些无法适应干旱环境的动物也随之灭绝。

每一种因素都导致了一些物种灭绝，综合那么多因素，就形成了有史以来规模最大的一次生物大灭绝。整个地球的生态系统，也是由此获得了一次最彻底的更新！

有利有弊，弊的方面说完了，下面说利的方面——这样一次灭绝给恐龙这样的爬行动物的演化铺平了道路。科学界也普遍认为这次大灭绝是地球历史从古生代向中生代转折的一个里程碑，整个地球的生命轨迹从此发生了改变。

三叠纪

二叠纪大灭绝之后，地球上的生物有了5000万年的喘息机会，这一时期，就是三叠纪[8]。三叠纪的地球，和我们现今的地球是截然不同的，因为当时只有一块大陆。刚才说了，二叠纪的大陆都并到一起了，“拼图”的过程导致了很多生物的死亡。

拼完了之后就是三叠纪，三叠纪的这块大陆，叫作盘古大陆[9]。盘古大陆之外的地表上是一片一望无际的超级大海洋，这个海洋横跨两万多千米，面积和今天所有海洋加起来的总面积差不多。

5000万年的时间，对于生物来说，也足够演化出十分丰富的形态了。由于当时地球上只有一个大陆，因此当时的海岸线要比今天短很多。这样的海陆分布也造就了新一批的适应此种环境的陆地和海洋生物。就在这个时候，一些早期的恐龙开始在陆地上撒欢，只是当时他们的个头并不是特别大（详见第三章第1、2节）。

同样，三叠纪也以一次灭绝事件结束。

第四次生物大灭绝

三叠纪灭绝事件的原因，目前还不是特别确定，但大部分观点认为：是由于在2.13亿～2.08亿年以前盘古大陆开始分裂。这次分裂导致欧洲、非洲和美洲最终成形；同时也形成了我们现今世界的第二大洋——大西洋。

可想而知，这个过程自然也伴随着强烈的火山运动，这也是地球大陆形成以后最强烈的火山运动时期。这次事件灭绝了地球上至少50%以上的物种。其中损失最惨重的，应该还是海洋生物。不过，与上一次大灭绝不同，这次灭绝事件对于陆生动物的影响远没有海洋生物来得大。

在地球上的一些地方，甚至没有受到任何影响。虽然有一些早期的

恐龙还是因此灭绝了，但对于那些顽强幸存的恐龙而言，这次大灭绝反而彻底整顿了它们的生活环境，也为它们日后的发展提供了巨大的机会。在这之后的1.5亿年，恐龙逐渐发展成地球上最主要、块头最大、种类最多、数量最庞大的动物群体（详见第三章第4节）。

第五次生物大灭绝

辉煌的恐龙帝国，总有终结的一天。接下来的这次大灭绝事件，也是最为人所熟知的。关于恐龙的灭绝原因，最流行的说法是源于一次恐怖的小行星撞击事件[(10)]。大约在距今6600万年前的白垩纪末期，一块大约有一座小城镇那么大的小行星，撞击在了如今墨西哥尤卡坦半岛的东北角，并且在海岸线附近形成了一个非常巨大的陨石坑。

具体是什么导致了恐龙灭亡呢？相信大家已经看过很多资料了，比如陨石撞击产生的冲击波、引发的地震及海啸同时掀起了巨量的烟尘遮蔽了阳光。植物因无法进行光合作用而枯萎，植食性恐龙在饥寒交迫的情况下饿死了，随之肉食性恐龙也因为丧失了食物来源而消亡。总之，这一次大灭绝事件，导致了75%～80%的物种灭绝，也使得恐龙时代彻底终结。

新生代

还是同样的套路，白垩纪大灭绝同样带来了新的机遇。机会就留给了哺乳动物——我们人类的祖先。当时，哺乳动物的体形普遍非常小，它们可能会找到一些比较理想的避难场所。同时，因为体形小，对于热量的需求也就没有恐龙来得那么大。所以，只要找到一丁点食物就能够活下去。可以说，哺乳动物是苟延残喘地度过了最近的这一次浩劫。在浩劫之后，哺乳动物的祖先逐渐在幸存者的竞争中胜出，从而造就了如今这个我们熟悉的世界（详见第三章第5节）。

第六次生物大灭绝？

有不少科学家都持这样一种观点——从人类发展出文明开始，地球上的许多其他生物就进入了一个灭绝的高峰期。科学家估计，如果没有人类的干扰，在过去的两亿年当中，平均大约每100年有90种脊椎动物会灭绝，平均每27年有一种高等植物会灭绝。但在人类的干扰下，鸟类和哺乳类的灭绝速度提高了100～1000倍。



1600年以来，有记录的高等动物和植物已经灭绝了724种。过去的400年，全世界共灭绝了哺乳动物58种，大约是每7年灭绝一种（而绝大多数的物种更是在人类不知道以前就已经灭绝了）。这个速度，较正常的化石记录高出了7～70倍，这已经达到了大灭绝时期的“灭绝效率”。而在20世纪的100年当中，全世界灭绝的哺乳动物更是达到23种，大约每4年就有一个物种灭绝。这个速度较化石记录高了13～135倍。几乎已经可以断言：它们正在经历着一次规模空前的“物种大灭绝”！

肯定有人要问了，我们是否处在一次大规模灭绝过程的序幕当中？而这一次的灭绝事件，是否会导致地球上数以百万计的动植物物种甚至人类自己的消亡呢？在不少“第六次灭绝论假设”的支持者看来，这个答

案毫无疑问是肯定的。

如果这一天真的到来，结果又是什么呢？回顾前五次大灭绝，我们不难发现，对于地球生命这个整体来说，哪怕惨烈如“二叠纪大灭绝”96%的物种消亡，可浩劫之后，依然会迎来重生。而幸存者，往往不在当时食物链的顶端，反倒是那些角落中并不起眼的生物。至于不同时代的那些顶级掠食者，由于处在食物链的顶端，恰恰是最先遭殃的。

处在如今这颗星球食物链顶端的我们，又是否会像当年的恐龙那样，成为“第六次大灭绝”首当其冲的受害者？如果历史再一次重演，那最后的赢家又会是谁呢？是我们人类的赢面更大，还是适应力更强的老鼠，甚至蟑螂？

别忘了，地球不属于人类，而人类属于地球！

大登陆时代：苔藓登陆和四脚的鱼

回顾地球生命史的线索有很多条，不同的线索相互交织，最终汇成了如今这多彩的地球。上一节，我们顺着历次大灭绝这条线进行了梳理。而在这其中，其实还隐藏着一条更为精彩的线索：生命起源于海洋，而我们则生活在陆地。那大家有没有想过，一代又一代的生物先辈如何一步一步地将荒芜的陆地变成郁郁葱葱的生命乐土？接下来，就带着大家一起去回望生物史上的那段波澜壮阔的“大登陆时代”。

最早的生命

故事的开头可能会超出绝大部分朋友的想象，我们会先从一位看上去无关紧要的配角说起，那就是“土”。大家有没有想过，“土”是如何一步一步慢慢演化成如今的样子的？这就得从大约38亿年前说起了。

那个时候的地球刚刚经历了“炼狱模式”，频繁的陨石撞击逐渐变少

了。慢慢降温的地球使得液态水终于有机会在地表上积聚，于是，湖泊、海洋、河流以及我们所熟悉的水循环终于出现了。

水循环的出现对于“土”来说是一个重要时刻——由于水的冲刷、侵蚀，岩石逐渐被瓦解，矿物质逐渐沉积下来，而这时土壤的基础结构开始出现了。而在土壤的基础结构出现后不久，地球上最早的生命形态出现了，时间大约是在35亿年前。

很难说在这个时候“土”和“生命”之间有着怎样的逻辑关系。而且，这时候的土，还不能称为真正的“土”，因为“土是有生命的”。[(11)]

为什么说35亿年前就有生命了呢？这个就来自一些化石结构的证据——一种由原核生物所建造的微生物席结构。直到今天，这样的过程仍然在持续发生着。而所谓的“微生物席”则是我们登陆故事的第一位真正主角。

微生物席

微生物席可以理解为由微生物组成的一张“席子”，面积通常非常巨大[(12)]。和真实的席子一样，微生物席也非常薄，最厚也不过数厘米。但也别小看它，在如此薄的尺度范围，微生物依然创造了较为宽泛的化学环境梯度——从最上层的“富氧层”到最底层的“严格厌氧层”，形成了一个分工明确的生态系统，也提供了多种多样的生态位，使得生态类型各异的种群得以在此定居。

根据已有的化石记录，微生物席或许就是地球上最早的一批生命形态。自从约35亿年前出现至今，一直是地球生态系统的重要成员和维持者。

第二章讲过，目前有关生命起源的最主流观点是“海底起源说”。科学家认为，生命源于海底那些“热烟囱”或热液口的附近。这些最古老的生命形式，就生活在这样一种高温[(13)]、高压、缺氧、偏酸和漆黑一片的

无光环境中。

现在看来，这种环境对于大部分生命而言无疑是“炼狱模式”。可即使在如今的海底深渊中，这样的生命形式依然在类似的环境当中顽强地存在着，30多亿年的时光似乎在它们身上停住了脚步。它们中的一些，以氧化热泉里喷出的还原性硫化物（如硫化氢、硫化钠）为生；另外一些，则能从“热烟囱”所释放的不可见的红外光中获取能量，进行一些简单的代谢活动。

经过漫长岁月地质历史的演化，这些原始的生命祖先体内出现了一些变化：原本用于利用红外光的色素逐渐得到了改进和提升——它们开始可以捕获并且利用可见光的光能了。这个时候，微生物席就不再仅仅局限于海底那不大的“热烟囱”或热液口附近，它们的范围逐渐扩散到了更为宽广的“光照区”[(14)]。

顺着这个思路，微生物逐渐向着光照更充足的浅海进发。渐渐地，它们抵达了海洋与陆地交界的岸边。这个过程非常非常漫长，好在对于几十亿年前的微生物来说，它们最不缺的就是时间——它们“前进一小步”的时间，或许足够恐龙从兴起再到灭绝了。

这个时候，那些靠近岸边的微生物已凭借利用太阳的能力制造出大量的有机质，而这样的微生物席结构，最终也为原始的海滩贡献了巨量的有机养料。再混入些经由岩石产生的矿物质成分，土壤的雏形就出现了。

很可惜，微生物席的步伐暂时止于此。尽管土壤的雏形已经有了，但早期土壤简单的内部结构就意味着水分和营养物质会很快地流失殆尽。或许正是因为这个原因，当时陆地上仍是一片荒芜。生命被局限在了海洋里，这其中走得最远的一些，也至多抵达了海滩。毕竟，在这样水陆交界的地方，依然受到海洋的呵护。

在生命诞生后的二十几亿年，陆地对于生命而言始终是“咫尺天

涯”。此前也多次说过，更诡异的是，整个生命演化的脚步似乎暂停了。在这漫长的岁月里，似乎没有任何生命能够产生足够的适应力，从而离开海岸向陆地推进，进而占据那广袤又荒芜的陆地。

7亿～5.5亿年前，就是在“雪球地球”逐渐融化的时候，在海边的一些岩石与沙滩上，真正的转机出现了——故事的第二位主角正式登场，这就是地衣。

地衣

地衣长得有点像紫菜，人们也容易把它和苔藓混在一块。地衣到底是什么呢？它很复杂，它是一种真菌和藻类的混合体，一种稳定而又互利的联合体，真菌是其中的主要成员。至于苔藓，则属于标准的植物，和地衣有根本的区别。

说起来，地衣着实是一类令人印象非常深刻的有机体——它的所谓身体组织是由藻类和真菌共同构成的，有的时候还有细菌的参与。而藻类、真菌和细菌这三者，其实代表了生命的三个界。

藻类可以进行光合作用，从而为地衣这个联合体提供能量；真菌的功能是吸收水分，防止地衣整体脱水。真菌拥有长长的细丝，这就非常适合从周围的环境当中收集水分。更重要的是地衣当中还含有一种能够进行光合作用的蓝细菌——这个名字大家已经太熟悉了，它们可以从环境当中汲取氮。当它们死亡的时候，这些氮元素便融入了土壤当中，逐渐提升了土壤中养分的蓄积量。正是这种紧密的关系，使地衣拥有了极强的环境适应性。

为了能够征服坚硬的岩石，地衣还会分泌酸性物质，从而加速岩石的风化。这就意味着，地衣不仅占据了地球早期的土壤，它甚至还在逐渐改造着土壤。由此，随着一代又一代地衣死在了沙滩，土壤也就变得越来越肥沃了。

在海陆交汇的狭窄地带，“先头部队”地衣的出现，为后来者打好了基础。地衣虽已算上岸了，但由于它们的生存充分依赖水，因此，没法离开岸边太远。所以，生命登陆这部大戏的序幕其实尚未到来。

藻类

如果说地衣还算不上严格意义的植物的话，接下来登场的这位，则属于严格意义的植物了。

不过，我们的视线暂时还得回到水中。就在地衣开始尝试经营海岸的时候，海洋当中的生命形态正在经历着史无前例的巨大变化。这一时期，生活在海里的藻类植物也有了长足的进步。

在“雪球地球”融化之后，复杂一些的红藻与褐藻已经脱离了单细胞生命的低级趣味，它们开始向着宏观生物发展。古老的紫菜和海带开始点缀起了当时的海洋，最早与它们相伴的则是海绵、水母、蠕虫这样的生命形态[(15)]。

到了寒武纪，大家就很熟悉了，几乎是一瞬间的工夫，节肢动物、软体动物、腕足动物和环节动物等忽然就出现了。再看此时的陆地，虽然在一些潮湿的海岸或低地已有了些地衣的渗透，但是它们无法向更干燥的内陆进发。至于动物，它们的上岸那更是亿万年之后的事情了。

可以说，虽然寒武纪的海洋里一片欣欣向荣，但是那个时候却依然没有真正意义上的陆生生物。大陆依然是毫无生气、荒凉一片。如果可以穿越回当时，从太空俯瞰，飞船上所能望见的大陆，除了黄色的沙漠和灰色或褐色的山脉之外，最多也就是两极或高原上零星分布的冰川，陆地上几乎没有绿色。

但如果我们足够细心，便能够发现，在靠近海岸的浅海处，绿色似乎开始越来越浓郁了。在越来越多的动物开始闹腾着海洋的时候，在海洋较浅处生活的一支藻类的体内渐渐发生了变化。除了古已有之的叶绿

素A，它们还合成了叶绿素B。这就使得光合作用的效率大大提高，它们的形态也得以越来越复杂。

这就是绿藻类的植物，在藻类当中它们属于比较高级的一种。绿藻类的兴盛使得寒武纪的浅海里有了更多绿色的装点。在外形上，绿藻类甚至有了类似高等植物的“根、茎、叶”的构造。不过，因为在功能上这些所谓的“根、茎、叶”都能够进行光合作用释放氧气，与后来的植物区别很大，所以我们只能称之为“叶状体”。

再看此时的大气条件——经过近岸植物旷日持久的不懈努力，这个时候的地球大气含氧量已经达到了大约如今大气含氧量10%的水平，臭氧层也已经开始形成。别小看这个细节，这对于后来生命的大举登陆非常重要。臭氧层这道防线，使致命的紫外线得以被更多地屏蔽，这样一来，即使离开水体的保护，生命也不至于被“晒”死。

地衣改造了沿岸的土壤，植物又改造了大气。与地球相比似乎微不足道的生命，竟可以逐渐改造地球，而它们的武器，就是时间。当然，地球这个超级复杂的大系统最有意思的一点就在于：生命本身在不断影响着环境，反过来环境的变化又会迫使生命去适应它。

最早的根

到了气候温和的奥陶纪，浅海广布。世界上许多地区都被浅海海水掩盖着，这就使得浅海变得空前繁荣，绿藻也向着水陆边界或海岸线缓慢推进着。越靠近岸边，水的稳定性就会变得越差。伴随着潮起潮落，这些藻类便始终处在一种“水陆交替”的环境下。可以说，植物的最初登陆是被迫的。

这些生活在潮间带和季节性湖泊边缘的藻类植物，一方面，由于经常需要从水体中暴露在空气里，它们的细胞初步分化为短小的茎和叶，另一方面，它们似乎还需要一种区别于以往悬浮漂移的模式来生存——

老这样漂着也不是办法啊，赶紧想个办法固定下来。

于是，一种类似于假根类的固定植株的器官出现了。之所以称为假根，则是因为其仅仅起到固定于陆地及支撑空间的作用。与此同时，它们还演化出了类似于“枝”的分化，只不过，这时候的植物还没有发达的维管系统，它们的营养物质大部分还是靠浸水时直接获取，并不会像如今高等植物那样靠根系从土壤吸取养分。

裸蕨

熬过了奥陶纪晚期的第一次生物大灭绝，到了大约4.4亿多年前的志留纪早期——今天故事的第三位主角终于登场了，这就是“裸蕨”。顾名思义，除了没有根之外，它们也没有叶子，看上去光溜溜的。与它们的前身，那些尝试登陆的绿藻类一样，裸蕨类植物生存的环境也是水陆交替变化的环境。不过，它们对水的依赖性更弱了。可以说，生命真正意义上在陆地立足，就是从裸蕨类开始的！而这也是浩瀚的生物演化史中值得铭记的一刻！

或许是因板块运动造成的陆地升高，又或许是因一些其他的环境改变，一部分裸蕨开始向那些潮湿的陆地推进。在这种湿润的陆生环境下，植物发生了适应性的分化——比如根系的形成与发达，维管系统的发育，枝叶的形成与伸展，繁殖方式的进一步演变。在这个阶段，真正意义上的“蕨类植物”出现了。

蕨类——最早的根与叶

这种植物就更厉害了。虽然说它们依然喜欢较为潮湿的环境，但是它们在形态上已经形成了明显的陆生器官。发达的根系让植株可以牢固地扎根于土壤中，更重要的是它们的营养代谢已经从“依靠整支植株表面来吸收”发育成“依靠专有根系来吸收”了。这样一来，在生长根域的范围内，它们便能够汲取发育所需的水分与各种营养。

与裸蕨对应，蕨类的另一大特征就是有了真正的叶子。为了撑起更大的光合空间与表面积，植株分化出具有较大光合表面积的叶片，向四周伸展以摄取更多的光合能量。同时，也分化出类似于枝的茎，除了支撑空间，还具有维管，以达到运输调整水分与营养的功能。这样一来，蕨类植物便可以把光合作用产生的养料与根系所吸收的营养与水分进行科学合理的调配。另外，由于茎、叶不需要具备吸收水分的功能，它们的表面还演化出了与外界的隔离层，防止内部水分蒸发。这样一来，植物更具备了长得高大的基础条件。

这时候的植物，已经和我们熟悉的植物越来越像了！接下来需要做的，就是把生命的种子撒向更远的地方了。

最早的种子

此时，世界上第一颗种子还没出现，那时候的植物靠的是“孢子生殖”。这也是在陆地上生存的一个非常重要的条件——陆生植物脱离水体生活，必须具备能适应陆地生活的繁殖方式，它们采取的策略就是“孢子生殖”。

这种繁殖方式有助于植物体的散布，减少对水的依赖。早期的陆生植物多具有三缝孢子，通过三缝孢子的散播（借助风力等）、萌发（形成配子，完成受精），完成繁殖的过程。三缝孢子一般是保存在一个囊状物里，即孢子囊。孢子囊的着生位置、形态等特征往往是鉴别早期陆生植物的重要性状。随着植物的发展，孢子囊逐渐演变成胚珠，而孢子也逐渐演变成种子。

苔藓的登陆

继续回到故事的主线，志留纪之后的泥盆纪，也就是距今差不多4亿年前。这时候的地球处于高温且潮湿的状态，非常有利于蕨类植物的生存。此时再从太空俯瞰地球，陆地已经点缀起越来越多的绿色。顺便

再说一下，除了蕨类的出现，这一时期，苔藓也正式出现。关于苔藓的起源也挺有意思的，有一种观点认为，它们从绿藻开始再次以类似裸蕨的方式逐渐登陆；还有一种观点则认为，或许是裸蕨中的一支最终演变成了苔藓的样子。

还记得一开始着墨颇多的“土”吗？早期植物开始大举向陆地蔓延产生的一个结果便是——它们促成了更明显的土壤结构，还将大量的磷和钾等营养物质掺入了土壤之中。这就增加了土壤和海洋中营养物质的含量。换句话说，这时候的土壤更加肥沃了。

菌根

不过，严格来说，使土壤肥沃的很大一部分原因倒不是那些早期植物本身，而是栖居于它们根部的真菌。这些“菌根”产生于约5亿年前，甚至比植物最早的根系诞生的时间还要早。和前面说过的地衣内部的真菌很像，“菌根”同样是与具有光合作用能力的植物相互合作来实现目标的，与地衣中的情况类似，这种合作对双方都有益。

“菌根”会产生大量长长的须丝，这增加了植物获取养分的范围并使其更牢固地扎根于土壤中，还能够从土壤中吸收氮及其他营养物质。菌根的细丝同时也会加速岩石分解，从而释放出更多营养物质，包括磷、钙、铁等，进一步增加肥力。

科学家相信，这种互利共生的关系对于陆地的演化过程是至关重要的。这种互利关系帮助植物征服了早期的陆地。随着时间的推移，越来越肥沃的土壤最终才让植物有了更多的发挥空间——最终发展出了复杂的维管结构、叶片和根系。这一过程又将更多有机物带入土壤，并帮助稳定土壤，使之免于被侵蚀殆尽。

帮大家再梳理一下故事的主线。伴随着微生物席、地衣和裸蕨这三位主角的登陆，土壤这个配角正变得越来越肥沃，这又给了植物更大的

发挥空间。裸蕨之后的蕨类植物终于向着更深的陆地进发了！在这之后更是最终出现了以内陆条件生存的裸子植物，地球也真正意义上拥有了广袤的森林。

节肢动物

当陆地和大气在植物的改造下逐渐变得更宜居后，动物的到来则真正让陆地“喧闹”起来。提起最早的动物登陆者，你可别想当然地以为是“那种长着四条腿的鱼”。

寒武纪的生命大爆发后，海洋生物的竞争一直都很激烈。很长时间以后，一些动物不堪海洋里的拥挤，毅然踏上了完全陌生的另一个世界——陆地。而最早登陆的是节肢动物，没错，就是我们爱吃的螃蟹或是我们害怕的蟑螂的祖先！要知道，那时的陆地上除了植物什么也没有，所以根据推测，第一批上岸的动物应该是某些植食性的节肢动物。

刚上岸的节肢动物应该是无比幸福的，没有天敌只有食物，堪称完美的“地堂”。虽然，登陆的诱惑是巨大的，但动物登陆要解决的问题却远比植物多得多。比如，如何直接呼吸空气？如何解决在陆地的运动能力？如何隔离身体表面以防止体内水分蒸发？更不用说如何解决在陆地的繁殖了。

不过，纵使千难万阻，为了没有天敌只有美食的“地堂”，一切都是值得的！

和植物一样，节肢动物在登陆前也经历了漫长的“浅滩过渡期”。比如，动物界真正意义上的活化石——鲎，这种曾与三叶虫同时代的生物，四亿多年前就已经生活在地球上了。与数亿年前一样，如今鲎们平时钻入海沙内生活，不过退潮时也会在沙滩上缓缓步行，谈谈恋爱、晒晒太阳。

不过，陆地对于它们来说，无法称为家。除了偶尔的溜达，它们的

绝大部分吃喝拉撒依然要在水中解决。之所以举鲎的例子是想说明：在奥陶纪的时候，或许就有一些节肢动物开始尝试部分地陆地生活了[16]。

与鲎类似，这一时期，在海岸附近的浅滩里，许许多多的节肢动物正在逐渐向“彻底告别海洋”而努力着。终于，在志留纪的晚期，节肢动物很好地解决了这些问题。除了自带天赋加成的“既能支撑身体又能起隔离作用的几丁质外骨骼”，它们退化了体内的鳃，演化出了身体两侧各节上的通气孔（气门）、分节的肢，更采用各种方法保持卵内外的水环境等。总之，到了志留纪的晚期，节肢动物作为动物界的登陆先锋终于上岸了。

此后，凭借着较短的世代时间（也就是快速繁殖）和较强的适应性，节肢动物可以说是以“迅雷不及掩耳之势”占领了陆地。到了之后的泥盆纪，其中的一些种类更是一不做二不休地演化出了翅膀，占领了天空，这就是如今动物界真正的霸主——昆虫了（详见第五章第1节）。

四足鱼

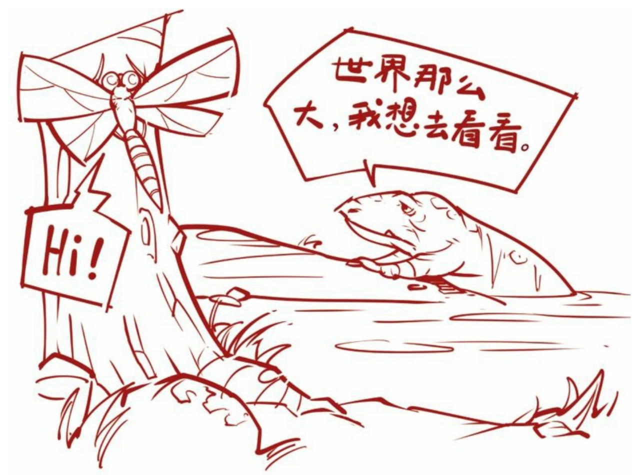
至于大家所熟悉的我们的祖先——脊椎动物的上岸，则是更后面的事了。按理说，应该再花点时间讲一讲鱼的演化，不过因篇幅所限只能简单说下。

正当寒武纪爆发出的各种动物享受着奥陶纪的美好时，一种全新的生命形态出现了，这就是最早的鱼。而奥陶纪尾声的那次大灭绝之后，早期的鱼儿们似乎有了更大的生存空间。而到了植物早已登陆、节肢动物初步登陆的志留纪晚期，鱼终于开始变得更像我们熟知的鱼了。上一节也说过，再后来的泥盆纪，也就是陆地上蕨类和昆虫相继出现的时代，水中则迎来了“鱼类的时代”。

是不是有这样一种困惑：水里的日子明明还不赖，鱼类的后代为什么最终也选择登陆呢？

也许是被逼的——关于古代氧含量水平的最新研究表明，水生植物的演化和水生生物的繁盛最终致使氧含量提高，从而形成更激烈的竞争(17)。虽然泥盆纪是海洋鱼类的时代，但鱼类的国度里同样有“三六九等”。也许，这种竞争除了将更多的节肢动物赶上陆地外，也促使了部分弱小的鱼类选择登陆，开疆拓土、另立山头。当然，除了“被迫上岸”的，也不排除还有些是“太能吃以至于把目光瞄向陆地”的大家伙。

总之，鱼类中一支叫作“肉鳍鱼”的分支，开始了向陆地进发的旅程。和那些曾经生活在岸边的藻类、节肢动物等登陆先锋一样，水陆交汇的岸边浅滩，依然是它们最终登陆前的“培训基地”。



大约3.6亿年前的泥盆纪晚期，最早的两栖动物出现了。最开始的时候，几个肉鳍慢慢演化成了笨拙的四肢，尾鳍也依然保留着，那时候的两栖类依然有太多鱼类的影子。虽然幼年时的它们依然离不开水，但发育成熟后，它们却已经能够开始在离水不远的岸边溜达——无论是躲避水里那些虎视眈眈的天敌，还是寻找更丰富的陆地食物。

总之这时候起，似乎再没有什么可以阻止脊椎动物向更深的内陆进发了！它们更不会想到，或许正是这种偶然也必然的登陆，使得它们最终躲过了主要发生于海洋中的泥盆纪大灭绝！

---

(1) 你可以分别找一张黄色和一张蓝色的材质相同的纸放在太阳下晒一段时间，你一定会发

现，相同的时间，蓝纸会比黄纸热一些。这是因为相比于黄色，蓝色会吸收更多的来自太阳的热量。反照率基本就是这个意思，光秃秃的陆地相比海洋，会反射更多的太阳能。要知道，我们的地球之所以温暖，是因为我们得以沐浴在阳光之下，地表的温度输入主要靠阳光。

(2) 冰碛岩是杂砾岩的一种，但并不是所有的杂砾岩都是冰碛岩。

(3) “人类世”由诺贝尔奖得主、荷兰大气化学家保罗·克鲁岑（Paul Crutzen）于2000年提出。他认为人类活动对地球的影响足以开创一个新的地质时代。2019年5月21日，由34位委员组成的人类世工作组发起投票（赞成票29票），决定正式向国际地球科学联合会提出申请，在地质年代表上加上“人类世”，起始时间为20世纪中期。原因是自第二次世界大战以后，人类社会各方面急速变化，包括人口增长、化石燃料消耗、人类改造环境的能力增强等，这些影响扩大到整个地球，人类正以前所未有的速度改变着我们所居住的星球，并且超越了自然的力量，成为影响地球环境的主导力量。

(4) 显生宙（Phanerozoic Eon）包含古生代、中生代、新生代；隐生宙（Cryptozoic Eon），生物化石稀少和不存在的寒武纪以前的地史阶段，相当于前寒武纪的同义语。

(5) 日语中没有“v”这一发音，音译时，通常都会以“b”代替。

(6) 石炭纪（Carboniferous）时陆地上出现了大规模的森林，给煤的形成创造了有利条件，因而得名；二叠纪（Permian）是古生代的最后一个纪，也是重要的成煤期。二叠纪这个名称是我国科学家按形象而翻译的，最初命名是在1841年，由莫企孙根据俄乌拉尔山乌法高原所处的彼尔姆州命名为彼尔姆纪。后来，又在德国发现这一时期的地层呈现出由白云质灰岩与红色岩层组成的上、下两层结构，这也是我国后来翻译成二叠纪的根据。

(7) 与前章中提到的罗迪尼亚超大陆不同，这一次形成的超级大陆为盘古大陆。

(8) 三叠纪（Triassic），1834年，由阿尔别尔特命名于德国西南部，这里有三套截然不同的地层，因此得名。

(9) 盘古大陆（Pangea）也译为“泛古大陆”。

(10) 也有说在白垩纪晚期，恐龙的多样性已经大不如前，开始呈现出颓势，或许小行星撞击只是“压垮骆驼的最后一根稻草”。

(11) 土是地壳、水蒸气、大气和生物圈相互作用的结果。

(12) 智利的研究人员就在南美洲的西南岸发现过一张巨大的微生物席，它的覆盖面积甚至相当于整个希腊。

(13) 300℃以上。

(14) 根据阳光照射度的不同，海洋一般可以分为4层3区。阳光通常可以照亮水深200米以内的海水；200～1000米，光线就变得十分微弱；1000米以下时，几乎就是一片漆黑；到了4000米以下，除了发光生物外，则是彻底的漆 黑。

(15) 这里指埃迪卡拉动物群（Ediacaran biota），20世纪古生物学最重大的发现之一。主要由

类似水母类、蠕虫类、海鳃纲的生物所组成，多保存为印痕化石。尽管它们的形态、结构都很原始，但这一发现使科学界摈弃了寒武纪之前不可能出现后生动物化石的传统观念。

(16) 目前认为的可能最早移居陆地的生物是巨型羽翅鲎（Megalograptus），体长约2.43米，生活在距今约4.5亿年前的奥陶纪。

(17) 维管植物的祖先真正繁盛之前的差不多1.5亿年间，大气氧含量水平一直比较稳定。但维管植物的出现改变了这一切，全球氧含量水平急剧上升，而这种条件可以允许鱼类变得更大，繁殖更多，更具捕食性——或许正是这种大型捕食性鱼类的繁盛导致了其他生物为了逃避被捕食才最终实现“登陆”的。

第三章　浩劫之后又重生，地球生存争霸战

兽族崛起，从“哺乳动物”的祖先说起

在我们通常的概念里，哺乳动物在演化史中登场的篇章起码应该是在恐龙时代的末期，在此之前，陆地这个舞台上的主角要么是节肢动物，要么是两栖动物，要么是爬行动物。在中生代，恐龙更是大家心目中绝对的NO.1。但接下来的这部分关于陆生动物的史诗，我却偏偏想从“哺乳动物”的祖先开始说起。

先热个身，回答两个问题：什么样的动物才是哺乳动物？你能想到哪些关键词？

毛茸茸的？

海豚也是哺乳动物，但它们为什么光溜溜的？

胎生的？

鸭嘴兽也是哺乳动物，但它们却是下蛋的。

温血的？

鸟类也都是恒温动物呀！

比其他动物更聪明的？

……

毕竟，按照一直以来的认知，哺乳动物似乎“更高等”。鱼类、两栖类、爬行类、哺乳类之中，似乎哺乳动物最高等，越往前越低等，而生命的演化就是向着“更高级”这一方向不断前进。但如果真是如此，为什么在属于“爬行动物”的恐龙统治的时代，所谓“更高级”的哺乳动物却没能占到便宜，只能苟且偷生呢？如果以当时的视角来看，估计你会说恐龙更“高等”吧！况且，按照人类所谓的标准，许多恐龙的脑容量都不小，应该会比不少哺乳动物更聪明。

差点被你绕进去了——哺乳动物，都会“哺乳”的呗！

切中关键了。但是，有一种长得像大蚂蚁的蜘蛛——大蚁蛛，它们刚刚孵化的幼蛛会通过吸食母亲分泌出的液滴而生长发育，甚至在最开始的半个多月，就是靠这种分泌物存活。你可以认为这种分泌物就属于“大蚁蛛妈妈的乳汁”，而且经过成分测定，这种“蜘蛛乳汁”的蛋白质含量是牛奶的4倍左右。当然啦，像大蚁蛛这样会哺乳的节肢动物肯定不能算哺乳动物。所以哺乳行为，也只是哺乳动物的一个“必要条件”。

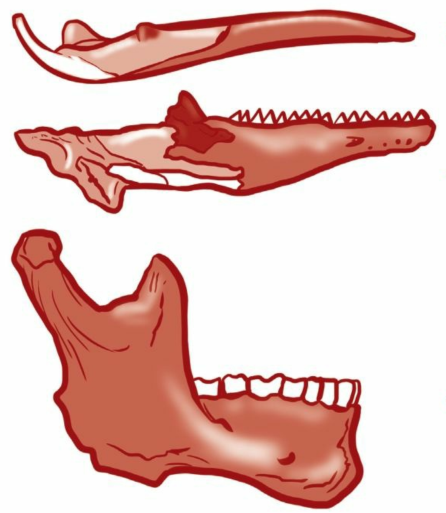
对于哺乳动物的定义，我们换个表述，界限就会清晰很多：能通过乳腺分泌乳汁哺育后代的脊椎动物。

接下来，我们再来思考这样一个问题：如果只给你看骨架甚至骨头化石的话，你如何判断骨头的主人是否是哺乳动物？

这下是不是就有点难办了？毕竟，如果只剩骨头的话，似乎就找不到能分泌乳汁的“乳腺”了，更不用说毛发、胎生这类特征了。

前面我们提到的恒温、毛发、乳腺等都属于软组织特征，用来判断现生动物妥妥够用。但如果是已经灭绝的古生物，我们则需要依靠“骨骼特征”。简单来说，哺乳动物最明显的骨骼特征是在我们的头骨上

——我们的下颚，是一块完整的骨头！这一点与鸟类、恐龙、爬行动物都不同。



更加深入一点的话，我们哺乳动物的耳内有由锤骨、砧骨、镫骨这三块骨头组成的听小骨；而且，我们拥有类似门齿、犬齿、臼齿这样分化的牙齿形态，称为“异型齿”，这一点与其他有牙齿的动物，比如鳄鱼、蛇、恐龙等，有着很大的不同——它们嘴里的牙长得基本都一个样，这叫“同型齿”。掌握了以上这些基本规律，你也可以像古生物学家那样去鉴定头骨化石了。

这些骨骼特征上非常明显的差异，也让古生物学家开始思考这样一个问题：既然哺乳动物的骨骼以及牙齿特征与爬行动物相比区别那么大，是不是说，在很早很早以前，它们就已经分家了？

那哺乳动物的祖先又是谁呢？应该不是恐龙，毕竟，它们的骨骼差异很大，而且，恐龙时代已经有哺乳动物了。更古老的类似鳄鱼、蜥蜴这样的爬行动物？细究化石的话，其实也相去甚远。

目前我们可以明确的是这几点——哺乳动物不是从恐龙演化出来的，哺乳动物与恐龙肯定有一个共同的祖先，只是这个祖先生活的年代到底有多久远？换句话说，“我们的直系祖先”与“恐龙的直系祖先”分家

的时间到底在何时？它们的后代接下来又经历了怎样的起起伏伏，最终形成了如今的生物格局？故事还得从3亿4000万年前的石炭纪说起……

羊膜动物的兴起

鱼类与两栖类只有一层内膜，也称为胚膜。在石炭纪茂密的森林中，有些两栖动物试图摆脱它们的卵对于水的依赖。它们的卵演化出了外部的膜（羊膜）和柔软的外壳。因此它们可以直接在陆地上产卵，这就比在危机四伏的水中产卵更加安全。这种卵叫作“羊膜卵”。

可以说，这就是最早的“蛋”。这样一来，它们的一生都可以彻底在陆地活动了——不用再寻找池塘、小溪或者小水坑繁衍后代，这也使得它们可以向更广袤的内陆进发。而这类动物，就叫“羊膜动物”。

你是否想指出，不对啊，这种动物不应该叫爬行动物吗？这是一个很有意思的问题，我们先留着。那时候的陆地，其实是被各种巨型昆虫（蜻蜓、蟑螂等）所统治的，所以它们上岸之后的日子并不算舒坦。但好在生存的空间变大了，繁衍下去的机会也更多了。

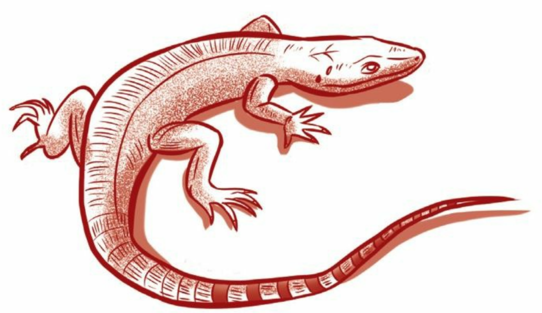
两千多万年后，这些外观类似于“蜥蜴”的羊膜动物就形成了两个主要的分支。区别就在颅骨上，以始祖单弓兽（Archaeothyris）为代表的一类动物，在头骨的两侧、眼眶的后面，各出现了一个位置靠下的“颞颥孔”[(1)]。还有一类以林蜥（Hylonomus）为代表的动物，则不具备这样的结构。如果仅从外观来看，它们长得依然很像，但如果从骨骼的角度来说，差异已非常明显。

按照如今的分类系统，始祖单弓兽这一类动物以及它们的后代，被归入“合弓纲”，意思是有着“固定的颧弓”；而林蜥这一类动物以及它们的后代则属于“蜥形纲”，意思是类似于蜥蜴的形态。你猜猜，以上哪一类是我们的直系祖先？

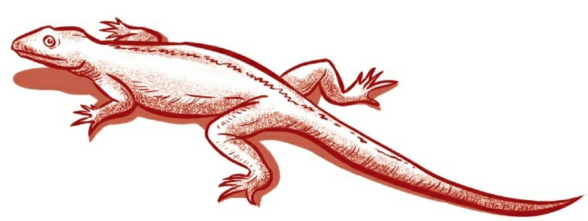
送给猜“始祖单弓兽”的朋友一朵小红花。你或许记得生物老师说过

的：哺乳动物是由爬行动物演化而来的。但其实，现在生物分类学上已经不使用“爬行动物”和“爬行纲”这样的说法了。我们可以理解为，从两栖动物中演化出了合弓纲和蜥形纲这两支“羊膜动物”。现在通常认为这两纲是并列关系，而非演化关系。

蜥形纲就包括了我们通常所说的蜥蜴、乌龟、蛇等这类爬行动物，还有恐龙以及恐龙的后裔鸟类；至于合弓纲，现存的直系后裔，就是我们哺乳动物！而这一切的证据，都可以从环环相扣的骨骼化石中研究获取。



始祖单弓兽



林蜥

不知道你是否注意到，始祖单弓兽虽然长得很像蜥蜴，但我们用“兽”来称呼它——如果“中二”一点，它就是目前已知的“万兽之祖”。另外，林蜥作为恐龙的远古祖先，也可算是“万龙之母”了。

虽然此时的合弓纲动物与后来的哺乳动物相比，还有着极其巨大的差异，但我们“兽族”的故事，其实从石炭纪就已经开始书写了。

如果你要问：这个时候的“龙族”和“兽族”到底谁更厉害？说实话，

还真分不出什么高下。毕竟在虫族的阴影之下，它们都处于食物链的中下层地位。上一章也说过，石炭纪的陆地覆盖着广袤的森林，该时期全球的平均含氧量在32%以上。因此，包括昆虫在内的许多节肢动物体形发展得异乎寻常之大，毕竟它们才是陆地和天空的先行者。先发以及环境优势，使得羊膜动物在巨虫面前没啥机会（详见第五章第1节）。

不光是虫族，别忘了，水边可还有巨大的两栖动物亲戚，它们才是当时的脊椎动物王者（详见第四章第1节）。当然，成也氧气败也氧气！过去的一亿年来，陆地完全由森林覆盖。它们的枯枝形成了一层遍布全球且厚达30米的煤炭，简直就是一个全球级别的火药库啊！

3.06亿年前的一天，一场大火不期而至——由于极高的含氧量，火势扩散得很快，没过多久，就蔓延至全球。而且，这场火一烧就是30年……大火覆盖了全球陆地大约一半的面积，而另一半没有着火的地区，则受到了大量有害气体的影响。大量温室气体也使得全球平均气温在10年内上升了5℃。而在之后的100年，全球平均气温更可能一度达到了30℃[(2)]。

可想而知，即使没有被烧死或毒死，在这段艰难的岁月，大量的动物可能都被饿死了。有毒气体的挥发持续了近1万年，这次燃烧引发的灭绝事件在5万年后才算基本结束。这就是被称为“石炭纪燃煤事件”的灭绝事件。当然，这并非我们今天的重点。其中一个结果就是，两栖动物受到重创，而“巨虫时代”彻底终结。

两方面的劲敌都退场了，属于羊膜动物的时代开始了。二叠纪这个新时代的陆地，注定属于羊膜动物！

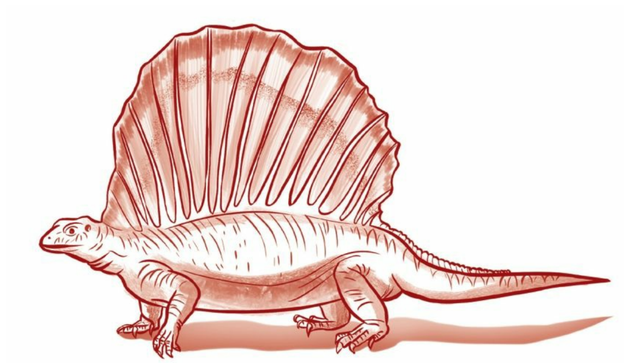
兽王初现

你猜猜，羊膜动物里的龙族和兽族，也就是“蜥形纲”和“合弓纲”到底谁在这时候取得了优势？或许大部分人都会认为是“蜥形纲”。毕

竟，“合弓纲”的后裔哺乳动物，一直要等到恐龙灭绝以后才繁盛起来。

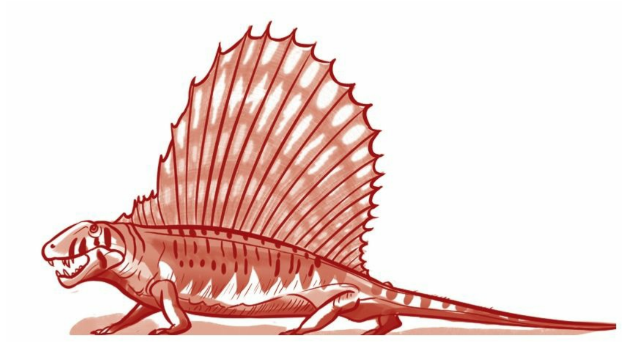
答案恰恰相反，当时率先崛起的是我们“兽族”的祖先——合弓纲。有几个说法：一是由于合弓纲率先发展出了前面提到的颞颥孔，而蜥形纲出现类似的特征则可能晚了1000万年，因此一些比较好的生态位就被合弓纲先占了；二是合弓纲的先祖们率先发展出了在垂直方向上容易弯曲的脊柱[(3)]，在四足爬行的时代，这可是了不得的优势，可以让它们跑得更快，毕竟速度为王。

或许还有其他的各种机缘巧合，在浩劫后的重生时代，合弓纲的动物迅速兴起。一个代表性的早期类群就是盘龙（Pelycosauria），名字听上去像是“龙族”的成员。由于早期对于生物的演化路径研究得还不是很清楚，因此在命名上存在着许多“龙兽不分”的情况。现在我们还是研究得很清楚的，盘龙是地地道道的“兽族”。



基龙

比较出名的有“基龙科”和“楔齿龙科（Sphenacodontidae）”的物种，只看图的话，你真有可能以为它们是一种恐龙——比较典型的外貌是有着类似大蜥蜴的身体，背上顶着一把类似大扇子的帆状物，怎么看都不像是“兽族”的成员。当然，并不是所有的盘龙目动物都有这样的帆，至于很多人好奇的帆的作用，应该是控制体温的器官，或者求偶时的视觉炫耀物。



异齿龙

盘龙这一类动物的多样性还是非常丰富的——有体长达到6米，重达2吨的杯鼻龙（Cotylorhynchus），就有点像犀牛。基龙的体长也有3米，与杯鼻龙一样，它们都是当时的大型植食性动物。即使是个头小一点的，也和猪差不多大。

至于它们的天敌，则是前面提到的同样有帆的楔齿龙科动物。这其中最可怕的或许就是异齿龙（Dimetrodon）了——这种肉食生物体形如熊一般，身长达3.5米。异齿龙的属名意思是“两种尺寸的牙齿”或者说“有两种不同形态的牙齿”。还记得吗？前面说过，哺乳动物的一个重要特征就是牙齿的分化。

这在当时算得上是革命性的装备——对于其他动物来说，切碎食物并不是件容易的事，往往只能吞咽下去。但像异齿龙这类的合弓动物可以用牙齿把食物切割成小块，以方便消化。因而，对于其他动物来说，异齿龙可算是噩梦一般的存在。

告别爬行

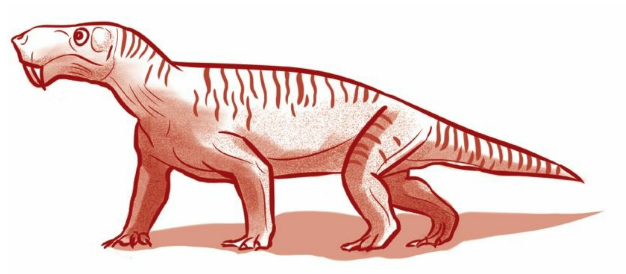
与楔齿龙类血缘最亲近的同样拥有异型齿的兽孔目（Therapsida），则发展出了更加厉害的特点——它们站了起来！

倒不是说和人一样直立行走，确切地说，是四脚着地的直立行走——类似于如今哺乳动物的行动方式，比如马、猫。如果还没明白是怎

么回事的话，想一想，鳄鱼、乌龟、蜥蜴这些所谓的“爬行动物”，它们的移动姿势是怎样的？可以说，它们是真的在“爬”，或者说类似匍匐前进。

虽然与现在的哺乳动物相比，兽孔目的关节依然有些朝外，但较为直立的步态依然赋予了它们强大的行动能力。这使得它们迅速占据了优势。在二叠纪接下来的时光里，它们迅速占领了生态位的高点。

兽孔目中，走植食路线的代表是“二齿兽（Dicynodon）”，顾名思义，通常拥有两个明显外露的牙，嘴巴有点像乌龟。它们的身体短短的，水桶腰，四肢很强壮。在二叠纪晚期，它们几乎就是“植食性动物”的代名词——已知有多达70个属，个头从“老鼠”到“牛”都有。



丽齿兽

至于肉食动物的代表，莫过于有着“二叠纪野狼”外号的“丽齿兽（Gorgonopsid）”了。这是目前已知的最早长有“犬齿”的动物，锋利的獠牙可以轻易地撕开皮肉，还有高超的奔跑能力，奔跑时速或许能超过50千米每小时。

它们的外形的确有点像狼，但比狼看上去更加凶残——早期的丽齿兽，体形一般不大于一只中型狗，而到了后期，丽齿兽光是头骨长度就可以达到45厘米，极少数大型个体甚至超过2.5米，重200～300千克。这哪里是“狼”，简直是“大老虎”了。可以说，它们就是二叠纪晚期陆地的最强王者！

巨兽阴影之下

二叠纪的“兽族”（合弓纲），可真的算是层层递进、全面开花！至于“龙族”（蜥形纲），基本上被“兽族”的生物压制得喘不过气来。生态位这东西和公司的职位差不多，一旦被人占了通常不容易空出来。除非，位置上的人升职了或者出了什么意外离职了。

生物的演化也是如此：由于合弓纲生物的先发优势，大型动物的生态位早就被兽族占满了。因此，虽然在二叠纪晚期，蜥形纲中的一些动物也开始“大型化”，但由于更大体形的“兽族”的存在，始终存在着发展的天花板。绝大多数情况下，在二叠纪“巨兽帝国”的阴影之下，当时的“龙族”只能苟且偷生。

这个桥段是不是似曾相识？对于此时的“龙族”来说，它们距离“翻盘”，还差了一次“大灭绝”。

二叠-三叠纪大灭绝

在上一章的《浩劫与重生》中，我们讲过地球史上最悲壮的一次大灭绝：大约95%的海洋生物以及70%的陆生脊椎动物都在50万年内忽然消失，大量的生物“蒸发”殆尽，甚至，整个海洋与陆地的生命迹象都基本消失。

这次大灭绝，也是延续近3亿年的古生代终结的标志，一次空前绝后的生物大洗牌。大家应该有这种基本认识了：每次大灭绝，首先遭殃的肯定是处于生态系统上游的大型动物，毕竟要供养它们，需要下游食物链的完备。可想而知，在这次大灭绝中，兽族帝国所遭遇的打击算是毁灭性的。

不仅是兽族帝国，整个地表世界基本都报废了。无论是合弓纲还是蜥形纲，除了极少数的例外，幸存下来的生物基本都是“比土拨鼠大不了多少”的、可以躲在地下的小角色。沿用公司职位的比喻：这次洗牌非常彻底，整个公司的中高级职位基本上全部空缺了出来，这就使得原

本不怎么起眼的、幸存下来的底层员工，甚至是实习生，又都站在了同一条起跑线上。

复兴的尝试

浩劫之后，又是重生。

在三叠纪最初的一段岁月里，二齿兽中的一支“水龙兽（Lystrosaurus）”成了占得先机的幸存者。也许是这种猪一般大小的动物能够挖洞和冬眠，从而帮助它们度过了地球上最恶劣的时期。在植物丰富的地球上，它们至少度过了100万年没有任何天敌和掠食者的“黄金时代”。

它们开始了大规模繁衍，一度遍布全球。在如今的南非、印度、南极，一直到中国新疆都有它们的化石发现。而且各大陆上所发现的化石极其相似，以至均归同属，有的甚至可归同种[(4)]。

三叠纪早期到三叠纪中期这段时间，兽族帝国虽然大不如前，但还算是“瘦死的骆驼比马大”。二齿兽类中植食性的肯氏兽（Kannemeyeria），更出现了体重达一吨的巨大个体。



水龙兽

食肉的族群里，则出现了犬颌兽（Cynognathus）这一长得跟“放大版的狗”相似的有趣物种。身长1米，重约40千克。虽然相比二叠纪的肉食前辈，体形并不算大，但它们身上还是出现了很多有趣的特点：进一

步独特化的牙齿，显示这类动物能在吞咽前有效地处理食物。次生颚的出现，指出这类动物可以同时呼吸与吞咽。胃部区域缺少肋骨，显示了重要的横膈膜的出现——这也是如今哺乳动物的重要特征之一。口鼻部骨头上的洞孔与管则指出了它们神经与血管的集中，暗示着它们似乎拥有胡须，甚至已经有了毛发。所有这些特征都指出犬颌兽是一种高新陈代谢率的温血动物，需要快速地处理食物与氧气。对于兽族来说，这又是一个大进步。



犬颌兽

在分类上，它们被归入了兽孔目（Therapsida）下的犬齿兽亚目（Cynodontia）。犬齿兽类的动物普遍都拥有较强的环境适应力，无论是生物多样性还是整体的数量以及分布范围，都是三叠纪兽孔目家族中最优越的。所以在三叠纪开始的相当长一段时间里，它们的日子其实过得挺滋润。似乎，兽族帝国的复兴指日可待了。

龙族崛起

可别忘了，之前的这次大洗牌，对于另外一类动物来说，同样是一个空前的翻盘好机会。在大灭绝之后，蜥形纲中的一支也演化出了“直立的移动姿态”，这就是“主龙类（Archosaurus）”。

对于蜥形纲来说，这也属于标志性事件。更快的速度、更低的功耗，此时的主龙类不仅熬过了灾难，而且还繁荣兴盛起来。随后，更是演化出了盘根错节的庞大家族。都说内部竞争激发团队活力，主龙类的

内部逐渐分成了两大支系，并且在三叠纪随后的岁月里展开了演化的军备竞赛。大家其实也很熟悉这两大支系的后裔：鳄鱼的祖先拟鳄亚目；翼龙、恐龙的祖先鸟掌亚目。

前面提到，无论在哪个年代，跑得快能获得的生存优势都是巨大的，但与善于垂直方向弯曲脊柱的合弓纲相比，蜥形纲的动物更善于水平方向弯曲脊柱。

回忆一下猎豹这一四足动物目前的跑步姿势，是不是很巧妙地利用了弯曲的脊柱协调了前后肢？但如果脊柱不擅长垂直向弯曲的话，是不是即使站起来了，靠着四肢也无法跑得更快了，类似现在的鳄鱼？

对于主龙类来说，最佳的解决方案莫过于"真的站起来"，用两条后腿跑，并且借助左右摆动的、粗大的尾巴保持平衡！无论是两大龙族的哪一方，要获得更快的陆地移动速度，都得朝着两条腿跑的路径发展。

比如波斯特鳄（Postosuchus），体长可达6米，巨大的头颅、粗壮的大腿、巨大的尾巴，神似后来的霸王龙。在三叠纪的中晚期，以波斯特鳄为代表的各种拟鳄类可以说是全面开花，登上了食物链的顶端。

当然，龙族之所以能够崛起，光靠活动能力的提升，其实也未必能实现对兽族的反超——毕竟，作为更早"站起来"的动物，兽族的活动能力也是不容小觑的。真正让龙族取得优势的，或许还有其他的法宝。



波斯特鳄

三叠纪早中期，大气环境具有两个重要特点：其一，含氧量断崖式

下跌；其二，气候异常地干燥。[5]

低氧的环境，使得“龙族”在呼吸系统上的优势显现了出来，这一点更是在如今的鸟类身上发挥得淋漓尽致（详见第五章第三节）。简单来说，主龙类演化出了独特的“气囊系统”，这使得它们更加适应三叠纪时期的低氧环境[6]。

在吸气时，肺部和气囊中都会充满空气；呼气的时候，气囊里还未被使用的空气会进入肺部，形成一种“双重呼吸”的结构。这样一来，肺里就可以始终保持可供使用的空气了。根据测算，它们的呼吸效率可到哺乳动物的2.5倍以上。

针对干燥的环境，龙族或许还有另一件可能的法宝，讲起来或许不怎么雅观——和“撒尿”这件事儿有关。

观察现存的那些主龙类的后裔，无论是鳄鱼还是鸟，它们排泄尿素的方式都是“糊状”。因此，我们可以推测它们的主龙类先祖大概率也采取同样的方式。反观如今的哺乳动物，我们的身体在排泄尿素时会附带排出大量的水分。这种差异，在湿润的时代并不致命，但放到干旱的三叠纪早期，经过漫长岁月的累积后，前者的优势就会被放大得十分明显。

或许正因这些因素的叠加，到了三叠纪的中期，属于“龙族”的黎明到来了！

龙族的黎明，以一场持续了近200万年的雨季开始

熟悉地球史的朋友肯定早就明白了一个道理：没有什么是永恒的。在持续了一千多万年的大旱后，到了晚三叠世，陆地上的生物终于还是盼来了“甘霖”。这可不是一般的降水，而是一场持续了近200万年的雨季！

卡尼期洪积事件

起因是这样的：大约2.35亿年前，在如今的美国阿拉斯加和加拿大不列颠哥伦比亚省附近的兰格利亚，发生了一次规模巨大的火山爆发——根据地质分析，这次火山活动持续了500万年。因此，大量的二氧化碳源源不断地排向大气。

人类活动造成的巨大碳排放不过几百年，地球的平均气温就升高了不少。持续500万年的二氧化碳排放，对地球的影响自然是十分显著的：通过对化石的氧同位素分析，科学家发现，当时全球气温可能上升了4～7℃。可想而知，海水的蒸发量因而大大增加，大气中的水汽便越聚越多。另外，升高的气温也会逐渐加剧大气的活动，原本疲弱的海洋信风终于发展到足够强劲的程度。荒凉的内陆终于有机会被海风滋润了。

当然科学是要讲证据的，地球远古的气候信息，其实被很好地保存在了岩层中。三叠纪早期的岩层，通常是红色砂岩，而这其中还找不到二叠纪特有的泥煤碳。考虑到煤的形成需要丰饶的植物，而泥煤的形成更是需要植物死亡后堆积在沼泽这样的环境里，由此可见三叠纪早期的干旱情况。

不过，20世纪90年代，地质学家发现三叠纪的地层中夹着一层特别的“夹心”，在里面既有河床的痕迹，也有各种沉积物和淤泥，当然也包括了泥煤。这就说明，岩层所对应的地区，当时应该非常湿润。光是局部的话，其实并没什么好大惊小怪的——毕竟就算是沙漠，同样会有富饶的绿洲，干旱如三叠纪早期，也会有相对湿润的地区存在。可问题是，无论是欧洲、北美、中东，还是东亚的三叠纪底层，都出现了类似的夹心层，预示着当时极其湿润的环境。根据同位素的测量结果，这段超级湿润期，大约持续了至少100万年[(7)]。

这段时期所发生的，就是著名的“卡尼期洪积事件”。可想而知，这

对当时生态的影响无疑是巨大的。盘古大陆上，原本的那些不毛之地，逐渐变得郁郁葱葱，甚至森林密布。不仅如此，陆生植物的类群也因此发生了显著的变化。一个标志性的特征是：以松柏和苏铁类为代表的“裸子植物”异军突起，在晚三叠世，它们已经成了绝对的优势物种。

裸子植物，尤其是松柏类的繁茂，则附带产生一类非常有趣而且重要的化石——琥珀。这种宝贵的时间胶囊，可是帮了古生物学家尤其是古昆虫学家一个大忙。而且，就是从晚三叠世的地层开始，琥珀才大量出现。

很显然，这种环境的剧变，对动物的影响也是深远的。有些物种或许就此走向消亡，但对另一些物种而言则是崛起的绝好机会。

首先，卡尼期洪积事件也引发了一场规模不算小的灭绝事件。在海洋中，洋流、季风等的变化打破了旧的平衡，由浮游生物的减少引发的连锁反应，中断了不少海洋生物的前路（详见第四章第2节）；随着河湖湿地的增加，两栖类开启了一次收复失地运动；陆地上，植物的繁茂也给了昆虫更多的可能性，石炭纪后久未见到的“巨虫”再次出现，而昆虫的兴旺，又令许多小型捕食者有了丰富的蛋白质来源。

这时候的陆地，有两股势力正在暗暗较劲儿——“兽族”一方，自然是兽孔目；“龙族”一方，则是“拟鳄类”和“鸟掌类”。之前提过，鸟掌类的后裔中包括了翼龙和恐龙。

恐龙的起源

最早的恐龙到底是谁？这其实是一个和“南方古猿”同样迷人的问题。但细想之下，又会延伸出到底什么样的生物才能被定义为恐龙，这个关于恐龙定义的老问题。

如今关于恐龙的定义是：三角龙和麻雀的最近共同祖先，以及这个祖先的所有后代。[8]听上去可能有点绕，但你应该能注意到，这个“最近

的共同祖先”其实并没有具体指向某个物种，就像是一棵树上来自不同枝杈的两片或三片树叶——顺着枝条一路向下，我们需要找到那个最初的分叉点。由于我们不可能穷尽地球上所有的化石，况且地球上出现过的所有物种也不可能全都留下化石，因此，关于“最早的恐龙”这个头衔，可能永远都是临时性地属于某个物种了。

几乎可以肯定，我们发现的最早恐龙所处的年代，必定要晚于最早恐龙出现的时间。因为，我们能拍胸脯说这是恐龙，势必说明它的一系列特征已经足够让科学家判断为恐龙了。由此可推——它的爸爸妈妈、爷爷奶奶，甚至更早的祖先，应该也算是恐龙了。

考虑到生物演化的循序渐进，那么，在这种生物出现的几万年、几十万年甚至几百万年前，必定存在与之非常接近的过渡类型。并不是说某只“鸟掌类主龙”妈妈下了个蛋，孵出来的宝宝和其他的兄弟姐妹完全不同，恐龙就突然地出现了！

至于说，越过这个分叉点、继续向前去寻找更古老的祖先，也的确是一条思路——但谁又知道，找到的这个祖先，有没有可能只是与直系祖先较为接近的“表亲”呢？没办法，严谨的古生物学，就是这样恼人。

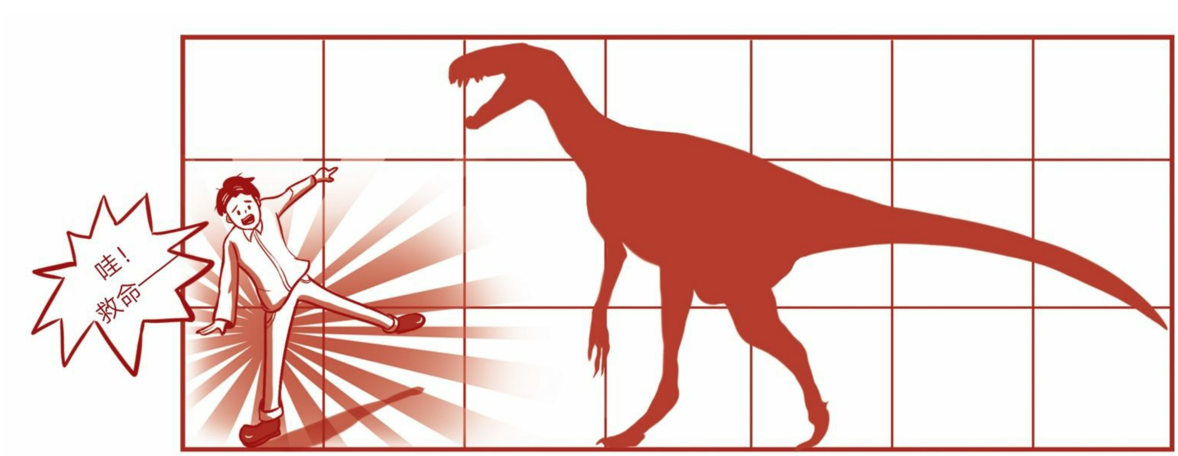
倒不如这样问：目前发现的最早的可以算作恐龙的物种，生活在什么年代呢？这个问题，就容易回答得多。关于“最早恐龙”的头衔，目前有这样几个有力竞争者，这几种恐龙，都出现在卡尼期。



始盗龙

比较公认的是发现于阿根廷的三叠纪晚期地层的始盗龙（Eoraptor），体长只有一米。考虑到它修长的尾巴、纤细的四肢和脖颈，实际上的观感，可能和火鸡差不多。当然啦，作为恐龙的老祖宗，已经能看出“小短手”的影子了。个头和之前提到过的体长6米的波斯特鳄相比，绝对是小不点了。从食性上看，科学家推测始盗龙应该是杂食，在林子里穿行，植物、小蜥蜴、小虫子都是它的觅食目标，可能有啥吃啥。

还有两个候选者则是埃雷拉龙（Herrerasaurus）和巴西的农神龙（Saturnalia）。先说埃雷拉龙，它是阿根廷一位叫埃雷拉的农民无意中发现的。埃雷拉龙个头就大了，体长5米，体重估计能有180千克，后肢强劲、听觉敏锐、尖牙利爪、身手矫健，是个厉害的猎手。埃雷拉龙这一类的恐龙化石在南北美洲都有发现，地理跨度很大。因此，科学家推测它们的足迹可能已经遍布四方。



埃雷拉龙

巴西的农神龙则是一种体长大约1.5米、重约10千克的恐龙，属于蜥脚亚目。虽然它的后裔中盛产“巨型食草类造粪机”，但它却有可能是肉食性的——2017年有篇报道：研究人员通过微断层扫描技术重建了它的大脑组织，发现这种恐龙的大脑有大量絮状物和半絮状物，这和它的

那些巨大的后代们很不一样。科学家进一步推测，这些絮状物是神经系统的一部分，控制头部视觉器官和颈部的移动，大量存在这种组织表明这种恐龙头部和颈部经常快速移动，可能是在捕捉体形小的猎物。



农神龙

对了，如果大家去检索“最早的恐龙”这个关键词，可能还会搜到一种名叫尼亚萨龙（Nyasasaurus）的“恐龙形类”物种——因为化石数量有限，所以很难确定它是否是标准的恐龙。但它的确又具备许多恐龙的骨骼特征以区别于更早的祖先，因此也有人认为尼亚萨龙是最早的恐龙。

如果尼亚萨龙是恐龙的话，那恐龙出现的时间就可以提前至距今2.43亿年。这种生物发现于坦桑尼亚，体长2～3米，但由于十分纤细，体重只有20～60千克。如果按照这个时间算的话，那么在大雨之前好几百万年，十分接近于恐龙的生物就已经出现了。我们也可以据此去推测，恐龙出现的时间，可能就在这个时间节点附近。



尼亚萨龙

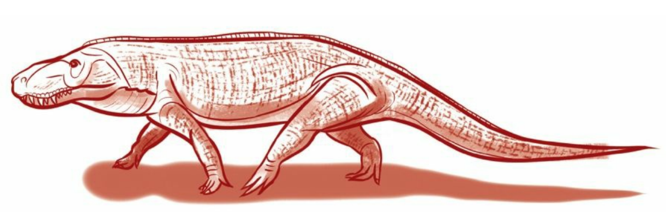
“龙族”的时代

当然，那场超级大雨带来的一个直接的变化则是，恐龙家族开始逐渐兴旺。而鸟掌类的另一大帮派、天空的飞行者翼龙，飞上天的时间也差不多就是这一时期，同样是距今约2.3亿年前的晚三叠世。

如果把范围扩大到整个“蜥形纲”的话，那么在三叠纪，蜥形纲真的是上天下海无所不能——鱼龙[(9)]也是在三叠纪下海的。在恐龙开始活跃的2.3亿年前，鱼龙也已经具备了优美的流线型身体（详见第四章第2节与第五章第2节）。

如果说，二叠纪的陆地属于“兽族”，那三叠纪毋庸置疑是“龙族”的天下，而且是陆海空全方位的称霸！

说起陆地“龙族”，大家可别只关注恐龙的崛起，虽然这时候已经有了埃雷拉龙这样“能打”的角色，但先崛起的“拟鳄派”也不是吃素的。除了之前介绍过的“波斯特鳄”，还有发现于巴西的迅猛鳄（Prestosuchus）。



迅猛鳄

迅猛鳄生活在晚三叠世，身长5米，大头大脑、圆滚滚的身躯、肌肉发达、牙齿锋利，巨大的咬合力可以迅速置猎物于死地。不仅如此，以迅猛鳄为代表的迅猛鳄类，又和波斯特鳄、巨齿龙这些大魔王一块儿组成了三叠纪晚期的“鳄霸军团”——劳氏鳄目。

这样看来，恐龙似乎没什么赢面。不过，比喻归比喻，但也借用一

下我的老朋友上海自然博物馆的何鑫博士常说的一句话：斗兽类的话题虽然有趣，但真实的自然里，动物肯定不会为了争霸而没事打架。

更何况，盘古大陆足够宽广，肯定容得下多位“霸主”的存在。而且，每个生态系统内，必然有各自处在食物链顶端的掠食者，这样的掠食者甚至还可能同时存在多个[(10)]。

这还只是掠食者这边的情况。植食性、杂食性的物种，和平共处的情况就更多了。还记得三叠纪早期遍布全球的水龙兽吗？由于这种动物本身伴水而生，因此，极有可能在干旱的三叠纪早中期，伴随着其他动物的兴起，它们终究是消亡了。之前也说过，到了三叠纪的中期，最常见的是肯氏兽，体形已经接近牛了。

二齿兽类的动物，在整个三叠纪呈现出了体形不断变大的趋势。而且，似乎在雨季之后，它们更是打算在“巨大化”这条道上一路走到黑！

最后的上古巨兽

2018年11月，《科学》杂志上刊载了一份重磅论文，向世人展示了一种名为“利索维斯兽（Lisowicia bojani）”[(11)]的史前巨兽。它们生活在晚三叠世，体长可达4.5米，高2.6米，体重9吨，堪比大象！而且，古生物学家还没法确定这具化石的主人是否已经成年。

更重要的是，与其他二齿兽前辈不同，它们的四肢是直立向下的[(12)]，而利索维斯兽这种站姿，则和如今的大型食草动物非常接近，可以说是非常超前了。虽然是“吃素”的，但也算是给我们“兽族”在“龙族”称霸的三叠纪挽回点颜面。

为什么说这个发现震惊世界，甚至堪称近几年最重要的古生物新发现——就是因为科学家也很疑惑，为什么在晚三叠世会出现比当时最大的恐龙还要巨大的二齿兽类。它的发现，甚至让许多描绘三叠纪的教科书都得重写。因为这几乎是上古兽族在“巨大化”这一路线上的“绝唱”。

兽族的后裔直到1.5亿年后的新生代，才再次发展出了这样的体形。



利索维斯兽

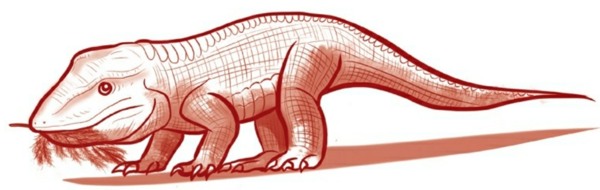
纵观整个三叠纪，失去了兽族引以为傲的“异型齿”后，二齿兽类能够寻找的演化突破口已经所剩不多，只能拼命地发展自己的“胃”，或者说是消化系统，可以更好地从植物中榨取生存所必需的养分。而巨大化加上皮糙肉厚，则可以一定程度地让一些捕食者知难而退。正是因为前进的道路越来越窄，所以越往后，二齿兽类的种类和数量越呈现出明显的衰退。

吃素的“龙”

要知道，植食性的物种要生存，压力可不仅仅来自掠食者，来自同行的争夺有时候同样要命——“龙族”里同样也有吃素的啊。而且，无论是拟鳄类还是鸟掌类，以及它们的近亲鳞龙类(13)，包括后来的恐龙，可都产出了不少“吃素达‘龙’”。



喙头龙



雷留图龙

比如主龙类的近亲喙头龙类（Rhynchosaurus），从中三叠世开始就挤占了大量原本属于水龙兽的生态位。

后来，拟鳄家族中也出现了大型的植食性物种。比如，雷留图龙（Revueltosaurus），现在认为是一种拟鳄，长得就很可爱。到了晚三叠世，浑身覆盖装甲的坚蜥目遍布全球，它们同样是植食性的。考虑到它们同期需要面对的可是自家那些超级“鳄霸”，这样的装备还是必需的。



板龙

与此同时，同样是在晚三叠世，巨大化的植食性恐龙也已初见雏形——比如板龙（Plateosaurus），就是已知最早的“巨型恐龙”。虽然不能和侏罗纪、白垩纪动辄几十米的后辈相提并论，但6～8米的体长、近4米的身高、5吨左右的体重，也足以让它在面对利索维斯兽时有泰然自若的底气[(14)]。

可见，即使以进食植物为生，三叠纪兽族所面临的竞争还是很激烈。这也是为什么前面说利索维斯兽的发现那么让人震惊了。原本大家以为，走巨大化路线的合弓纲，没道理能够撑那么久的，毕竟越往后，主龙类的多样性越丰富。

兽族的火种

回过头再看看，那些走食肉路线的“兽族”，它们的命运又如何呢？

还记得犬颌兽吗？这个物种在三叠纪中期的确很成功，从分布范围也可窥一斑——化石证据遍及亚非拉甚至南极。不过别忘了，它们如日中天的年代，毕竟是“龙族老大”们崛起之前。等到拟鳄、恐龙这些更强大的陆地掠食者带着“适应光环”相继登场，犬颌兽们的好日子也就到头了。到了“魔龙狂舞”的晚三叠世，它们的后裔基本只能以腐肉为食了。

感慨一下，犬颌兽真有点生不逢时，明明已经很“先进”了，可架不住别人弯道超车。当然，也可能是那场“大雨”导致的洗牌效应——毕竟，处在食物链的上游，你就必须面对食物链崩溃时首先遭殃的命运。

随着原本有相对优势的生态位逐渐被“龙族”挤占，犬颌兽所属的犬齿兽类也逐渐呈现出“小型化”的趋势，或者说，是那些小型的分支获得了更大的生存机会。毕竟，肉不能吃了，还能吃虫子，虫子吃起来太麻烦，还能啃叶子，而晚三叠世最不缺的就是虫子和叶子！这也是一直以来，我们对哺乳动物祖先的刻板印象——在巨龙的阴影下，靠着虫子、叶子、种子为生。

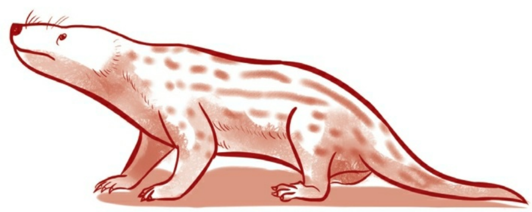
这一天，终究还是到来了！

不过回过头看，二齿兽那种正面交锋的“巨大化路线”，后来被证明是失败的；反倒是犬齿兽类这种机会主义者的“退居二线，甚至退居三线”，为咱们“兽族”保存了宝贵的“革命火种”。

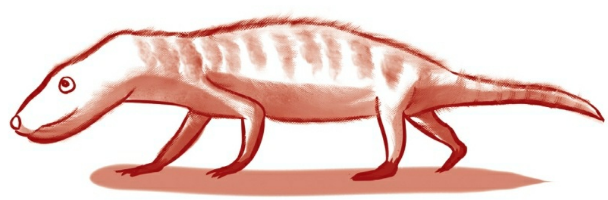
哺乳动物的直系祖先

在三叠纪，我们哺乳动物的直系祖先脉络大致是这样的：

三叠纪早期是三尖叉齿兽（Thrinaxodon），它们被认为是哺乳动物的直系先祖（或近亲），从个头和食性上看，你可以理解为是“三叠纪黄鼠狼”，属于早期的犬齿兽类；到了三叠纪的中晚期，有代表性的则是奇尼瓜齿兽（Chiniquodontoidea），属于真犬齿兽下目，体形从老鼠到小狗大小不等；而到更晚一些的时候，真犬齿兽下目、奇尼瓜齿兽总科中则有一支发展成了哺乳形态类，进而又延伸出“哺乳形类”。

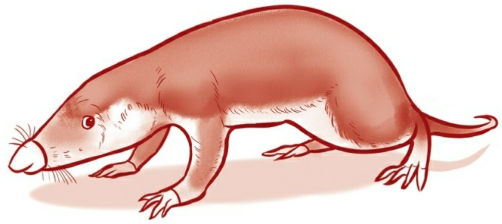


三尖叉齿兽



奇尼瓜齿兽

和恐龙形类类似，哺乳形类的出现，意味着在三叠纪晚期，已经出现了和哺乳动物非常接近的动物。而在三叠纪晚期的哺乳形类这条分支中，就已经出现摩尔根兽（Morganucodonta）这样“三叠纪老鼠”一般的穴居动物了。



摩尔根兽

逆境中的兽族，在巨龙的统治下绝境求生

时间回到两亿多年前的三叠纪尾声。这个时候，一度坚如磐石的盘古大陆，终于还是出现了松动的迹象。

这次超级大陆的分裂，也拉开了“第四次生物大灭绝”的序幕：剧烈的火山活动引发了一系列的连锁反应，最终导致了全球一半以上的物种消亡。其实整个灭绝事件的高峰持续的时间非常“短暂”，大约只有一万年（详见第二章第2节）。在一些地方，至今依然能够看到三叠纪-侏罗纪地层间的这道狭窄但又非常明显的分界线。

祸兮福兮，恐龙成了这次洗牌的大赢家。不过，在这次灭绝中，恐龙也同样遭遇了重创，这也是三叠纪与侏罗纪恐龙存在明显差异的原因。

大灭绝给恐龙的崛起铺平了道路，而原本称霸的“拟鳄类”，或许由于所处的生态位更高，又或许由于某些生理结构并不适应那残酷的灭绝期，总之，三叠纪结束后，“鳄家”辉煌不再。曾经的“鳄霸军团”无一幸存，只有小型的喙头鳄亚目（Sphenosuchia）与原鳄亚目（Protosuchia）[(15)]存活下来。

虽然从侏罗纪开始，原本属于“鳄家”的陆地头把交椅让给了恐龙，但在河流、沼泽、近岸海域这样的水域，“鳄家”的子子孙孙活得还是相当滋润的——从多样性的角度来看，甚至超过如今的鳄鱼（详见第四章

第2节）。后来的白垩纪晚期，更是出现了体长超过12米的恐鳄（Deinosuchus），吃起小恐龙来，简直一口一个。与大型陆生“拟鳄”一同消亡的，还有在卡尼期后一度复兴的大型两栖动物和绝大多数的兽孔目成员。

你是不是会觉得，这时候的兽族，都是毫不起眼的小不点儿了？的确，由于此时的陆海空甚至近岸水域都已经被“龙族”全面统治，而且龙族内部的竞争也早已白热化，因此，留给兽族的演化空间已然不多（详见第三章第4节）。一个有趣的视角便是：在漫长的恐龙时代，“兽族”又是如何演变的呢？

什么是哺乳动物？

再次梳理一下如今哺乳动物的一些重要特征：拥有可以哺乳的乳腺、绝大部分为胎生、大部分通体密布毛发、普遍听力发达、大部分都具有由三块听小骨组成的中耳以及普遍具有的外露的耳朵。根据生育方式，我们又可以把现存的哺乳动物分为两大部分：原兽亚纲和兽亚纲。

虽然现存的原兽亚纲的哺乳动物非常稀少，但我们依然能从它们身上窥探到不少兽族先祖的影子。原兽亚纲里最著名的应该就是鸭嘴兽了——卵生，没有外露的耳朵，虽然具备乳腺但并没有乳头，在腿部的后侧还有一对“毒针”[(16)]，都让它们显得如此与众不同。

与鸭嘴兽同属原兽亚纲单孔目的，还有针鼹，同样生活在澳大利亚[(17)]。虽然看上去有点像刺猬，但它们和刺猬的关系差了十万八千里。同样是卵生，不过与“鸭嘴兽将卵产于巢内”不同，针鼹妈妈会把一个“软壳蛋”放在自己的育儿袋内孵化。育儿袋内有乳腺，孵化后的小宝宝就可以在里面喝奶了。

再说兽亚纲这一支，这其中又可以分出两大派系：后兽下纲和真兽下纲。通俗点说，就是袋鼠、考拉这样的“有袋类”和猫咪、人类这样

的“有胎盘类”。

至此，我们也可以抛出对于“哺乳纲”的科学定义了：鸭嘴兽、袋鼠、人类的最后共同祖先，以及它们的所有后代。

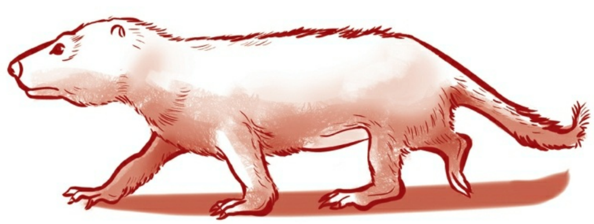
所以，在此定义下，之前出现过的“兽族”就没法看作哺乳动物，最多是“哺乳形类”。

虽然如今的哺乳动物早已是上天下海无所不能，但放到历史长河中，也仅仅是合弓纲“兽族”这棵巨大演化树上分出的一条“至今依然繁茂的枝杈”罢了。在历史上，其他的“枝杈”或许也繁茂过。探索古生物的世界，这个思维很重要。

接下来我们要重点探索的，就是繁盛于中生代的那些“兽族”分支。或许我们也能以此来想象我们的早期祖先可能是怎样一番模样。

卡岩塔兽[18]

2018年，《自然》杂志发表了一项有趣的发现：科学家在距今1.84亿年的侏罗纪早期地层里找到了一窝卡岩塔兽（Kayentatherium wellesi）的化石。这一窝可不得了，足足39个个体！你可能以为这是一个“大家族”，但事实上这其实只是一个“小家庭”。因为只有一个属于成年个体，另外38个全部都是幼仔。



卡岩塔兽

这信息量就很大了：要知道，如今的哺乳动物大体上都是走“少生优育”路线——虽然一胎的后代数量相比爬行动物、两栖动物这些要少

得多，但却会付出更多的精力来照顾后代，这也让幼仔的存活率大大提高。

这种动物虽然在骨骼上具备很多与哺乳动物相似的地方，但繁殖策略却又和我们大相径庭。科学家推测，这种类似“猫鼬”的动物就是即将跨过“哺乳动物门槛”的远古兽族祖先。

你是否好奇卡岩塔兽是如何喂养那么多宝宝的呢？毕竟乳腺这样的软组织，几乎不可能以化石的形式保存下来。关于哺育方式，科学家只能借助其他信息来推测。比如，这些幼仔的化石已经具备了完善的骨骼与牙齿。所以，它们在出生后或许并不需要乳汁的喂养。幼仔的大脑非常小、母兽的骨盆也很狭窄。这样看来，它们可能也不具有胎盘。

说起来，胎生的起源，也是一个至今未解的大谜题。而中生代兽孔目或哺乳形类动物的繁殖方式也依然迷雾重重。一样的道理，胎盘、子宫这些都是软组织，同样不太可能变成化石，或许，可以找到明确的“蛋”[(19)]。

不过，考虑到鸭嘴兽、袋鼠、人类间相去甚远的繁殖方式，科学家推测，中生代的这些兽族，可能是胎生、卵生，有袋、有胎盘并行的模式。

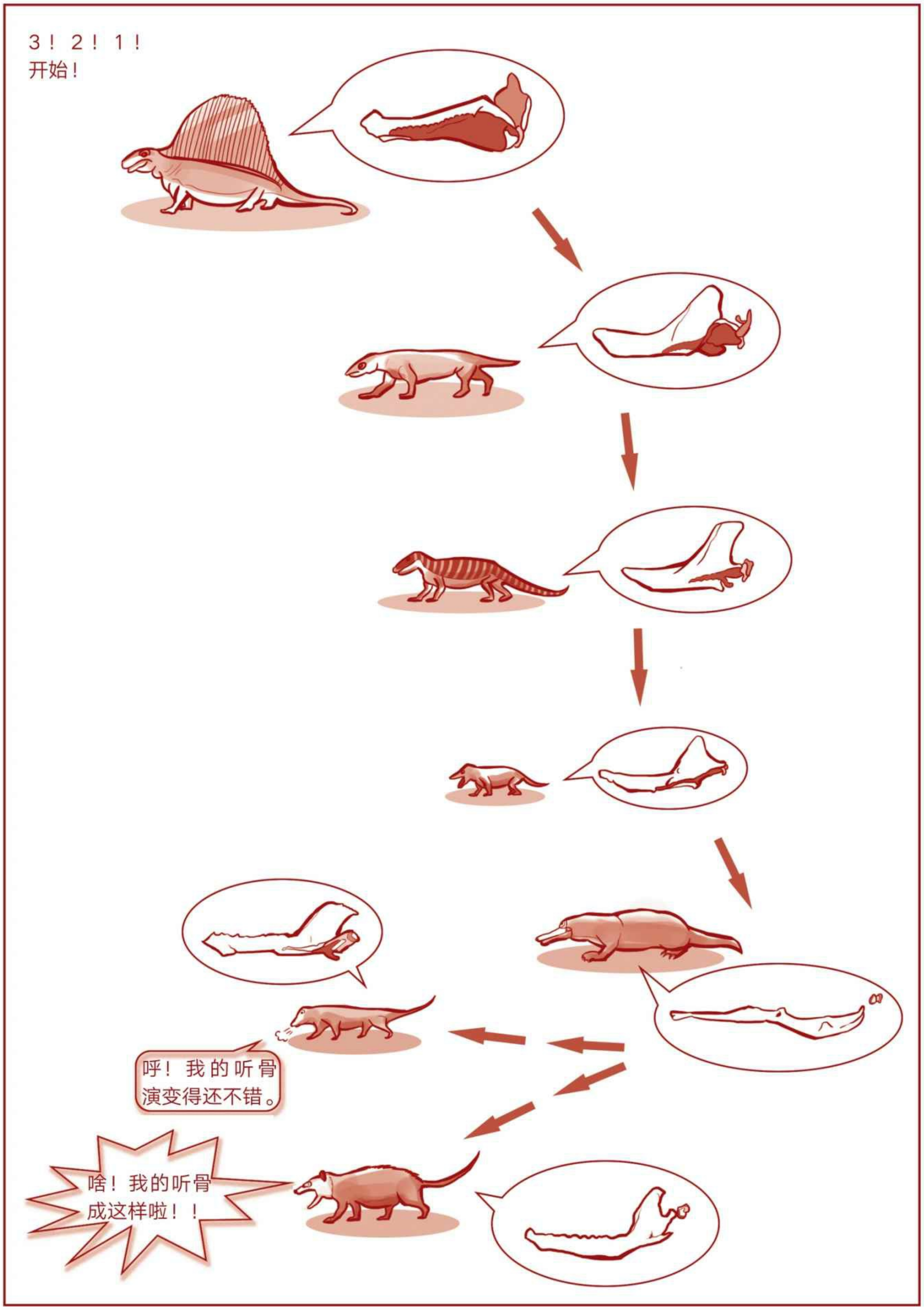
是不是觉得：绕了一圈，等于没说？！

科学就是这样，有时候“没有发现，同样也可以是重要进展”。不过，哺乳出现的时间倒是可以从化石里找到线索。虽然，“喂奶工具”几乎不可能找到，但“吸奶工具”却有可能以化石的形式留存。

要实现喝奶这样的动作，首先需要有吮吸和吞咽的能力，其次需要有咽喉部的舌骨及支撑它的肌肉来辅助，这一系列结构还形成了喉头。科学家发现过一种生活在1.65亿年前的柱齿兽，这是与我们哺乳纲关系非常近的一支旁系。这种田鼠般大小的动物，在咽喉部有保存下来的舌骨，这就让它成了目前所知最早的能像现代哺乳动物一样喝奶的动物。

按照这个思路推测的话，哺乳出现的时间，肯定还要更早。这里还带出了哺乳动物的另一个“不怎么引起注意”的“与众不同”，同样与口腔有关——咀嚼和吞咽[(20)]。能做到这一点，既归功于“异型齿”，也仰赖于我们可以弯曲的“舌骨”。这种特征，也起码可以追溯到1.65亿年前。

从爬行类合弓纲到现代哺乳类听骨的演化



从爬行类合弓纲到现代哺乳类听骨的演化

之前说过，在骨骼部分，哺乳动物一个极为重要的特征是拥有三块听小骨——锤骨、砧骨、镫骨所组成的中耳。这也是哺乳动物超群听觉的基础。相比之下，鸟类、爬行类的听小骨只有一块。那么这多出来的两块是怎么来的呢？

最初，这些骨头都是颚的一部分。你可以理解为，在当时，实现听觉和咀嚼功能的是一个“一体化的结构”。目前发现的早期哺乳形类动物，也保持着比较原始的下颌中耳状态。后来，在哺乳动物的演化中，一块上颚骨和一块下颚骨被中耳借用来与镫骨连接，逐渐又与齿骨分离，形成了一串三个用来放大声音的听小骨。

2019年11月，我国科学家就在《自然》发表了一项成果。他们在一块1.6亿年前的化石中找到了保存完整的中耳形态。化石属于一只盖氏热河俊兽（Jeholbaatar Kielanae）[(21)]。科学家发现，曾经属于头骨的方骨、下颌的关节骨都跑到了它的中耳区，并且完全脱离齿骨。

至于这样的好处，你可能已经猜到了——减少取食过程对听觉的影响。但这可能只是一个附带的收益，更重要的则可能是：盖氏热河俊兽的下颌骨能够做出比较大幅度的“前伸-回撤”动作，而独立的中耳，可以给这种动作的运行提供更大的空间，以便于它们取食。

当然，在其他“兽族”支系的化石中我们也可以看到，中生代的兽族先祖还分别发展出了原理类似，又各不相同的中耳结构，包括各种过渡类型，为它们在巨龙时代争取到了更多的机会。想想也是，更早注意到“风吹草动”，绝对有助于“龙口脱险”。

中耳的分离，算是脊椎动物演化史中，解剖结构从一种功能转变到另一种功能的最好例证之一。而咀嚼和听觉这两个模块的分开，从更长远的视角看，也给哺乳动物带来了一个更大的好处：可以根据环境不同，从容选择是走“提高听力”还是“增加咀嚼效率”的路线了，不至于一条道走到黑。

恐龙时代的兽族

在通常的印象中，大家或许会觉得，在恐龙统治的侏罗纪和白垩纪，哺乳动物或者兽族的其他后裔，几乎都是老鼠般的模样和大小。毕竟，似乎只有这样才方便在巨龙的阴影下苟且偷生。

不过，接下来我们要盘点几个家伙，就有可能会颠覆这种认知了。

你敢想象以恐龙为食的兽族吗？当然，不是吃梁龙、霸王龙这样的庞然大物。恐龙毕竟也有小块头，而且也有弱小的幼年期。有一种名为强壮爬兽（Repenomamus robustus）的家伙，生活在白垩纪早期，体形和如今的獾差不多。2005年，我国科学家在强壮爬兽化石中找到了鹦鹉嘴龙幼龙的骨头，而且，不少骨头的两端已经被溶蚀，这就说明是在胃里被消化过。科学家因此推测，强壮爬兽或许就是以小型恐龙及其幼崽为食。虽然是欺负弱小，但不管怎么说，也算是给兽族挽回点颜面。



强壮爬兽

除了吃恐龙的兽族，还有接近上天的兽族。当然，不是像蝙蝠那样

飞。哺乳动物真正上天，那是恐龙灭绝以后的事（详见第五章第4节）。不过，如果算上滑翔的话，这个历史就早多了。在我国辽宁省建昌县和河北省青龙县距今约1.6亿年的晚侏罗世地层中，发现两种最原始的、具有皮翼的滑翔哺乳型动物化石，分别被命名为似叉骨祖翼兽（Maiopatagium furculiferum）和双钵翔齿兽（Vilevolodon diplomylos）。名字有点奇怪，其实主要是在描述它们的骨骼特征。真正亮点在于，早在1.6亿年前，甚至恐龙都还没有飞翔天空的时候，兽族中就已经出现了祖翼兽、翔齿兽这样的树栖滑翔者了。

一系列非常偶然的际遇，使得它们的皮毛和翼膜在化石上清晰可见。如果你有幸能一睹似叉骨祖翼兽的化石的话，甚至都能借此想象出它们在空中展翼滑翔的身影，很像是如今的“鼯鼠”。从这个角度来说，侏罗纪的兽族，也是取得了很大的进步。当然，可以说是被逼的——既然地面不好混，那就上树讨生活呗。什么样的方式最适合在树与树之间穿梭呢？

更重要的是，在侏罗纪，翼膜这样的特征在哺乳形类或哺乳动物身上不止出现过一次。换句话说，不同种类的树栖“兽族”分别独立演化出了这种特征。不知道你是否注意到，刚才提到的化石，除了翼膜特征外，毛发也是清晰可见。这就说明了，起码在1.6亿年前，毛茸茸的外观应该已经是兽族的“标配”了。

其实，合弓纲的物种究竟何时出现毛发，一直是个谜题。早期的盘龙目，通常认为应该和蜥蜴类似，覆盖鳞片。但后来的兽孔目，对于它们到底有没有毛发，并无定论。而接下来提到的这种动物，则帮了科学家一个大忙。在1.64亿年前的侏罗纪早期，出现过一种形态和生态位都非常类似于现今水獭或河狸的适应水生环境的“兽族”——獭形狸尾兽（Castorocauda Iutrasimilis）[22]。

2004年，獭形狸尾兽的化石在中国内蒙古被发现。值得注意的是，化石本身保存得非常完好，而且还有明显的毛发印痕。借助一番推理，

兽族的毛发问题顿时明朗了许多。



獭形狸尾兽

你想：既然大部分哺乳纲的动物都有毛发，那么，所有哺乳形类的演化支应该都是这样。而獭形狸尾兽又属于哺乳动物的近亲，这就表明了并不是只有哺乳纲的物种才有毛发。化石证据又显示，獭形狸尾兽的毛发是非常先进和绵密的毛皮组织，并非早期的简单结构。所以，体表有毛发覆盖应该是整个哺乳形类的祖传特征。

至于为什么说它们适应水生环境，毛发就是一方面。科学家发现它们的毛发类似于鸭嘴兽，应该能够隔水保暖。另外，獭形狸尾兽有着类似河狸的扁平而宽阔的尾巴，整体上又像是水獭，它们的趾间还有类似蹼状物的存在，这就更加印证了这是一种非常独特的半水栖物种。

从体形上看，它们的长度接近半米，体重超过500克，虽然称不上巨大，但也绝对脱离了“苟且偷生”的刻板印象了。

读到这里，你或许也意识到了——在整个侏罗纪，“兽族”这一脉其实并非哺乳动物或者哺乳形类一枝独秀。三叠纪犬齿兽类的后裔，在侏罗纪的夹缝中同样百花齐放，虽然个头普遍不大，但分布范围和多样性都非常广泛。

除了初露锋芒的哺乳形类，当时更具代表性的是三棱齿兽科（Tritheledontidae）的物种。这种几乎已经和哺乳动物相差无几的类群，已经演化出肉食、植食、食虫、杂食等多个分支。只不过，它们并

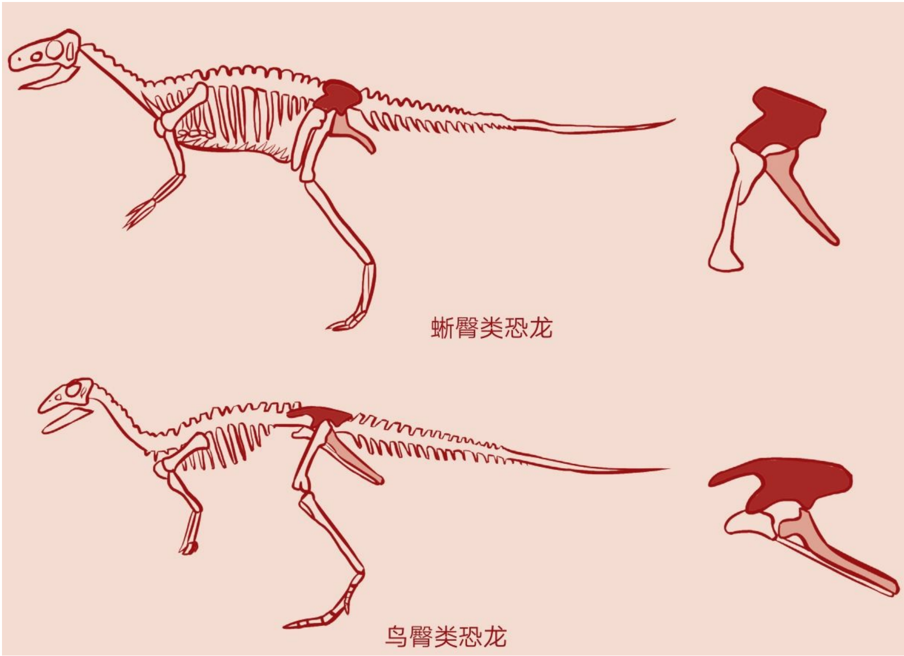
没有熬到白垩纪。[(23)]

虽然，“兽族”们整体上是在巨龙的统治下绝境求生，可处于相似的环境和生态位，还是免不了同门兄弟间的内部竞争。自然的故事毕竟不是童话，在环境选择的重压下，谁更具优势，谁更具演化上的“灵活性”，谁就更有可能在机会到来时，传承并发扬自己的血脉！

小知识点补充

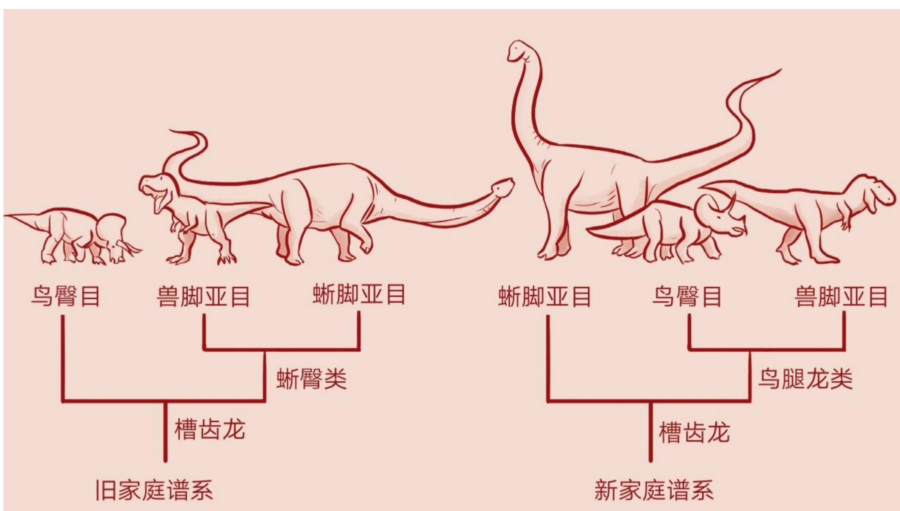
恐龙的分类

根据髋骨的构造，恐龙通常被科学家分为两大族群：拥有类似蜥蜴髋骨的蜥臀目（Ornithischia），和拥有类似鸟类髋骨的鸟臀目（Saurischia）。不过，根据髋骨的构造，生活于晚白垩世早期的慢龙（Segnosaurus）似乎很难被归入蜥臀目或鸟臀目，像是两者的混合体，因此也有些学者提出了与蜥臀目和鸟臀目并列的第三类恐龙族群——慢龙类（Segnosaurischia）。



进一步细分的话，蜥臀目又可以分为包含霸王龙和鸟类祖先在内的兽脚亚目（Theropoda），以及盛产植食性巨龙的蜥脚亚目（Sauropodomorpha）。而鸟臀目则可大致分成包含剑龙、甲龙在内的装甲亚目（Thyreophora），以及包含三角龙、肿头龙在内的角足亚目（Cerapoda）。

前两年，有科学家提出了一种新的观点，认为兽脚类应该与鸟臀目放在一起，即它们拥有更近的共同直系祖先。这样一来，就产生了蜥脚类（比如梁龙、雷龙）是否是恐龙的争论。按照此前的定义，恐龙是麻雀及三角龙最近的共同祖先及其所有后裔。麻雀（鸟类）属兽脚类的后裔，三角龙是鸟臀目恐龙，在这样的定义及新的观点下，蜥脚类就被完全排除在了恐龙家族之外。



侏罗纪恐龙的演化

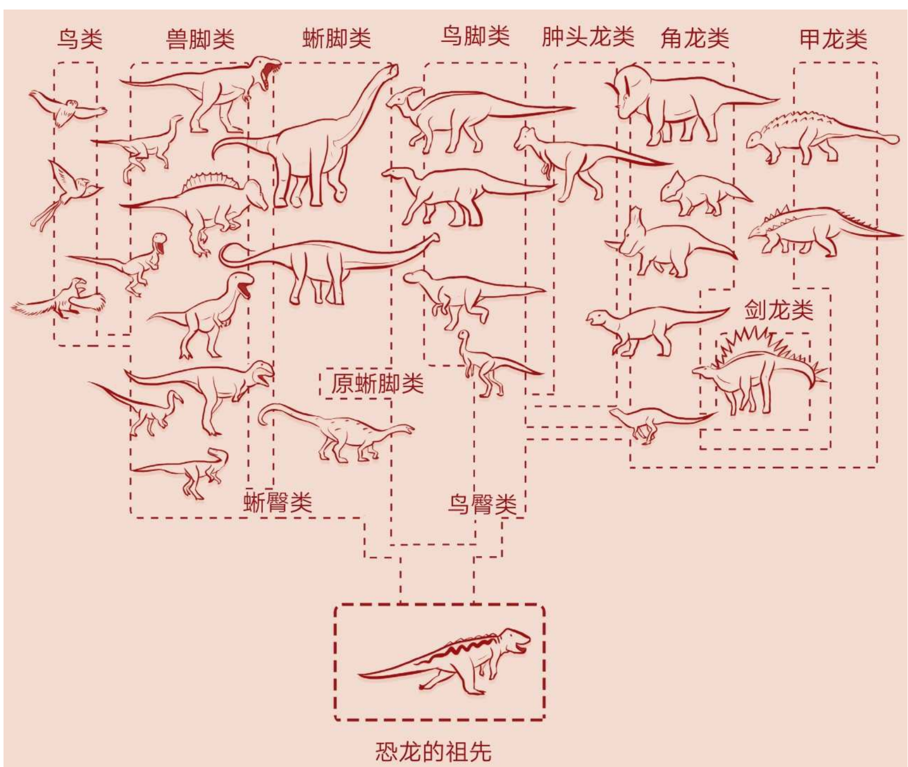
侏罗纪持续了5000多万年。在早期，幸存的恐龙由于缺乏强有力的竞争者，开始迅速兴起，占据了更多的生态位。

这时候，板龙、莱森龙等中型蜥脚亚目恐龙开始兴盛，其主要对手有兽脚亚目的南十字龙和双冠龙。而日后的另一大恐龙支系——鸟臀目，在侏罗纪早期还没有真正发展起来。

到了侏罗纪中晚期，恐龙已经彻底成了陆地上的绝对优势物种。这是一个真正的“巨龙时代”——大型蜥脚下目恐龙大批繁衍，如圆顶龙、雷龙、迷惑龙、马门溪龙、梁龙、腕龙等，它们以大型蕨类、大型苏铁或针叶林为食。

有了大型的猎物，自然也会匹配大型的掠食者，比如角鼻龙、斑龙、蛮龙、异特龙等。不过，在侏罗纪的后半段，鸟臀目的恐龙虽然已经出现（比如剑龙下目和鸟脚下目），但数量较之于蜥臀目恐龙来得少，从生态位看，地位也不高——它们属于中小型的植食者。

虽然多样性上似乎不如白垩纪时那么让人眼花缭乱，但恐龙帝国的派头已经十足了。

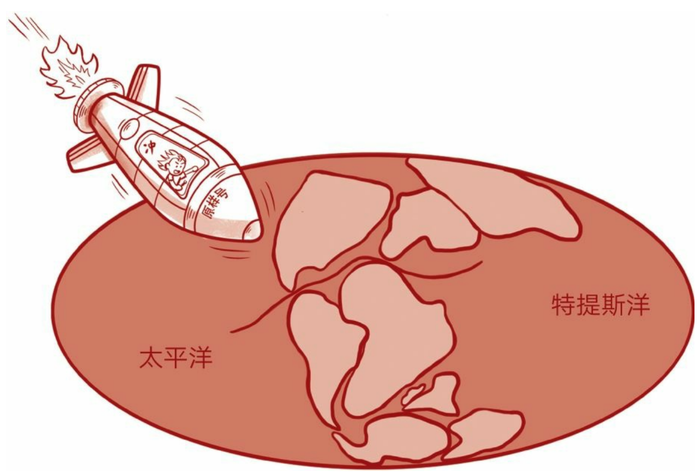


侏罗纪漫游指南，这时候的大陆大气和生物

这一篇我们会从一个更广阔的视角来看一看恐龙时代，由于《侏罗纪公园》的影响力实在太大，估计大家跟我一样也会觉得侏罗纪最具有代表性。但实际上《侏罗纪公园》和《侏罗纪世界》里出现的很多恐龙，并不属于侏罗纪，比如霸王龙、三角龙。接下来，我们就好好地去感受一下真正的侏罗纪的全貌。

由于这一篇的叙述我们并非按照时间顺序，而是希望以类似“穿越回过去”的方式来全方位探索，因此我们还需要选取一个比较精确的时间点。有了之前的铺垫，或许1.57亿年前的侏罗纪晚期是个不错的选择。毕竟，那时候的恐龙已经进入了全盛时期！

在我们穿越回去的侏罗纪晚期，地球上的大陆和现在我们所熟悉的样子差别很大。1.5亿年前，南半球最大的一块陆地主要是由如今的非洲以及南美洲组成，它们几乎还是连在一块的。我们管这片巨大大陆叫冈瓦纳大陆。



晚侏罗世的海陆分布

在这块大陆的南部已经开始裂出了一条深深的口子，这预示着在之后的几千万年，南美洲会和非洲正式分开。这就是南大西洋的雏形。在冈瓦纳大陆的东南方不远处还有一块巨大的陆地，在之前它们是连在一块的，这就是如今的南极大陆和澳大利亚，在当时它们也几乎是连在一起的。

几千万年以前，这块大陆才刚刚和冈瓦纳大陆分离。而在冈瓦纳大陆的北侧，大约是如今摩洛哥的位置（非洲的西北角），似乎是通过如今的伊比利亚半岛（西班牙与葡萄牙所在地）连接着北方另外一片广阔的陆地。当然，也可能是隔着一个小小的海峡（如今的直布罗陀海峡）。这块位于北半球的巨大大陆，面积也很大，它包含了如今欧亚大陆的大部分土地，还有北美洲以及格陵兰岛。如今，我们把当时的北方大陆称作劳亚大陆。

这片大陆或许被一些浅海分割成了若干块，但是我们依然可以把它视为一个整体。冈瓦纳大陆、劳亚大陆，以及如今的南极洲和澳大利亚所组成的一片大陆，围成了一个C形，东面有巨大的开口。而中间这片三面被大陆环绕的海域叫特提斯洋——它的遗迹就是如今的地中海了。

在我们穿越到的这个时间点，距今1.5亿年前，我们还能够在特提斯洋的西南角看到一个巨大的岛屿，它就是如今的印度。

大陆漂移的概念，对于我们回望远古尤为重要。为了方便起见，下文会出现很多如今的地名，但千万不要把它的位置和如今的位置等同，尤其是环境和地貌。虽然化石确实发现于此，但由于板块运动，现在的地理条件和亿万年前早就大不一样了。如今的热带雨林在当时可能是沙漠，如今的冰雪世界当时也许是森林，今天的那种戈壁、高原在当时可能还被海水淹没。

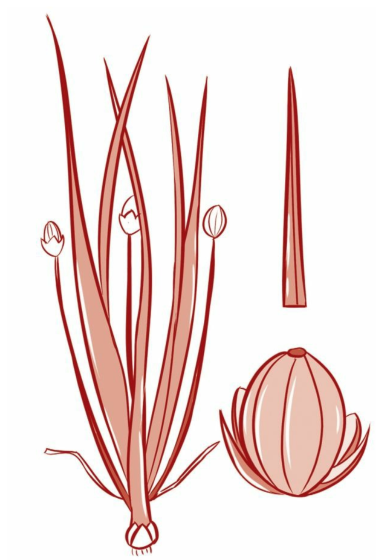
顺便说一句，由于潮汐的作用，地球的自转正在变慢，月球因此正在远离我们。所以，1.5亿年前，地球上的一天差不多是23小时17分钟，比现在要短一些。而月球距我们的平均距离要比现在近5700千米。当然，考虑到如今38万千米的地月平均距离，所以肉眼上你很难察觉出侏罗纪的月亮比现在“大”。

世界观搭建得差不多了，现在我们的“原样号”就可以穿越大气层在侏罗纪的低空飞行了。先检测一下大气含氧量，当时的含氧量比现在高不少，氧气在空气中的占比为26%～27%，二氧化碳含量则是工业时代

之前的7倍多。这种情况下，如果我们这些穿越者不做防护且长期生活，可能存在“氧中毒”的风险。当然，你还会觉得很暖和，甚至有点热——毕竟，这时候全球的平均气温比现在差不多要高3℃。

最早的草

侏罗纪时代并没有什么花，地球的陆地表面主要是由裸子植物和蕨类植物所覆盖。不过这一时期我们已经不能看到数十米高的蕨类植物了，侏罗纪时代的森林主要是由高大的松柏类和银杏类这样的植物所主导。和现在一样，当时的它们也是非常高大挺拔，得以享受森林最顶层的阳光雨露。在森林的中层，则是拥有大型羽状叶片的苏铁类植物，它们的后代现在还能看见。地表上则是郁郁葱葱地覆盖着一些低矮的真蕨类植物，这个和现在有些区别。



渤大侏罗草

你是否注意到，“草”这个词，在之前的一些章节出现得非常少。在介绍动物食性的时候，我也会用“植食性”这样的表述。这就是因为，植物学意义的草，作为一种被子植物，出现的时间非常晚。作为当今世界上最为繁盛的植物类群，被子植物的起源和早期衍化，长期以来一直是

一个巨大的谜团。关于最早的“草”出现的时间，目前的记录是1.64亿年前。2016年，我国科学家在距今1.64亿年的中侏罗世地层发现了一株小草——渤大侏罗草（Juraherba bodae）[(24)]。这是真正意义上的具有典型草本被子植物特征的草。这是目前已知的“最早的草”的记录。

考虑到这棵草生长的年代，比我们穿越的时间点还早了一千多万年，所以在这个时候见到“草地”也不是没可能的事。但几乎可以肯定，在1.5亿年前，最常见到的，还是那些由真蕨类植物和苔藓类植物所组成的“绿原”。

素食主义大块头

虽然草已经出现，但在这个时候，称呼恐龙中的素食者为“食草恐龙”无疑是不确切的，所以我依然倾向于植食性恐龙这一叫法。

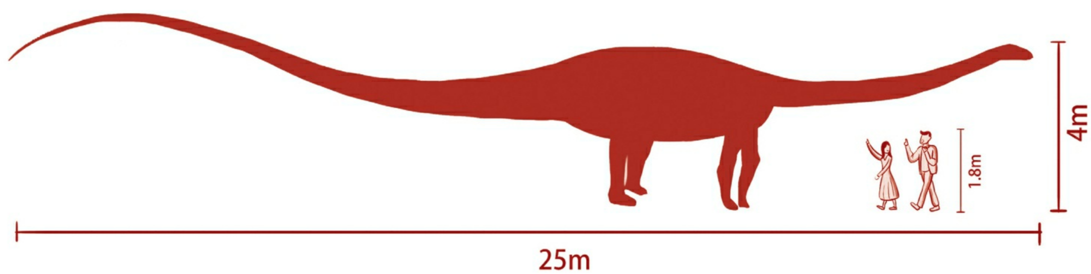
既然是“巨龙的时代”，不得不提的自然是那些“撼天动地”的植食性巨型恐龙了。比如雷龙、腕龙、梁龙，这些生活在侏罗纪中晚期的蜥脚下目恐龙几乎成了自然博物馆的象征，它们也是目前已知地球上出现的最巨大的一类陆生动物。之前说过，蜥脚类恐龙首次出现于晚三叠世，到了侏罗纪晚期，分布已经非常广泛了，尤其是梁龙科、腕龙科的物种。

对于我们这些“原样号”的游客来说，要找到它们并不难。先去劳亚大陆的西端，也就是如今北美洲的西部看一看。这里生活着大名鼎鼎的梁龙（Diplodocus）——梁龙也是一个属的概念，旗下有不少巨龙，它们的个体都非常巨大，最长的超过30米，体重在10吨以上。有个小细节，它们的鼻孔是位于眼睛之上的。它们的鼻孔通常认为是在头顶，因为在头颅骨的顶部有鼻腔的开口[(25)]。

笨重的身体、长长的脖子、长长的尾巴、粗壮有力的腿都是它们典型的外观特征。在以前的很多影视作品中，似乎都会把它们描绘成脖子

向上弯曲的姿态，给人一种高耸入云的感觉。考虑到长颈鹿可以凭借长脖子吃到高处的树叶，因而这种想象也合乎逻辑。

但有科学家就怀疑，它们的心脏能不能维持足够的血压，从而保证脑部的供血。根据计算，如果它们能够完成这样的仰脖子动作的话，或许需要一颗1.6吨重的心脏才行。此外，它们的颈部结构并不适合过度地向上弯曲。



梁龙

所以，现在一般认为，它们平时的姿态应该是把这个巨长的脖子平行于地面或者稍稍高于地面向前伸去，摆动着头部，扫食着前方的植物。也有研究者说，在必要的时候，梁龙可能会用两条后肢站立，再加上尾巴做一个支撑，这样就可以使得颈部向上来吃到高处的叶子。而这个时候，则真的是高耸入云了。

类似于梁龙这样的大家伙在当时的分布是比较广的，还包括腕龙（Brachiosaurus）、迷惑龙（Apatosaurus）、雷龙（Brontosaurus）等若干个属，分布在劳亚大陆和冈瓦纳大陆的各处。

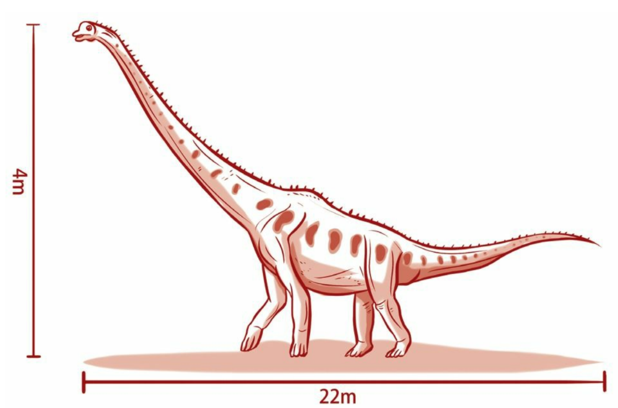
而在如今中国的土地上有一款样子也差不多的恐龙，那就是大名鼎鼎的马门溪龙（Mamenchisaurus）[(26)]。马门溪龙的全长也超过22米，体躯的高度接近4米。脖子占一半长度，是曾经生活在地球上的脖子最长的动物。

它的颈椎每一节都很长，而且数量达到19个，在蜥脚类恐龙中也是最多的一种。相比之下，长颈鹿和我们人类的脖子一样，都只有7块颈

椎。马门溪龙的颈部还有特别的肋骨，叫作颈肋，最长的可以达到3米，这种特殊结构也增强了它颈部的力量。不过也带来了一个缺点，它的脖子转动起来会比较困难。

在这一时期，我们还时不时能遇到另一种植食性恐龙——属于鸟臀目的剑龙（Stegosaurus）。这种经常能在儿童恐龙玩具包中见到的生物，也算是恐龙界的明星物种了。

在侏罗纪晚期，剑龙作为植食性动物在地理上分布是非常广泛的，它们的食物可能包括苔藓、蕨类、木贼、苏铁、松柏与一些果实。它们长有类似鸟的尖喙，喙里没有牙齿，不过嘴的两侧有些小牙。它们的进食策略和其他的植食性鸟臀目恐龙有所不同。除了剑龙以外，大部分的鸟臀目恐龙都拥有能够碾磨植物的牙齿，而且它们的下颚可以进行水平运动。但剑龙的牙齿缺乏平面，这就使得牙齿和牙齿之间无法闭合，它们的下颚结构也没法进行水平运动。因此，它们会顺便吞下一些石头来帮助肠胃处理食物。这种行为倒不是特别罕见，在一些现代鸟类和鳄鱼当中我们也会看见。



马门溪龙



剑龙

剑龙的背上最显著的特征就是17块板状的骨头，非常巨大。至于骨板的作用，说法特别多。有一个说法是当气温降低的时候，剑龙可以张开它的骨板吸收阳光的热量，气温升高的时候又可以把骨板转一下，利用凉风来散热。不过现在更多的观点认为它们可能用来武装自己，或者说是类似孔雀那样为了吸引异性。在尾巴的尖端还有长刺，应该可以当武器用，像狼牙棒似的；剑龙的前腿比后腿短，前腿有5个脚趾，后腿有3个脚趾。

根据推测，它们可能是群居生活。全长可以达到7米，如果算上骨板的高度身高可以达到3.5米，身躯接近大象。但考虑到当时已经存在梁龙、腕龙这样的巨无霸，它们也只能算是中型恐龙。相比于身体，剑龙的脑袋非常小，据说只有一个核桃那么大，科学家推测，它们可能不那么聪明。也有些古生物学家猜测，在剑龙的臀部可能还有一个“副脑”。

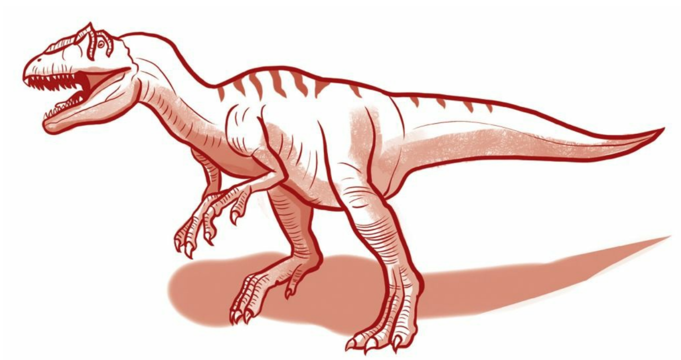
晚侏罗世的陆地霸主

这些恐龙虽然如此巨大，但它们依然有天敌，正如大象的幼崽和年老个体依然需要提防狮子。虽然那个时候还没有霸王龙，但大型掠食者并不少——侏罗纪晚期的“陆地霸主”候选名单中一定少不了异特龙（Allosaurus）。

身长约9米[27]，乍看之下你可能会把它们当成白垩纪的“大哥大”霸

王龙。不过，区别还是有的——相比之下，异特龙的头按照比例要稍小一些。它们还有几个显著的特征：眼睛上方拥有一对角冠，感觉像小眉毛一样，这个是由延伸的泪骨所构成的。鼻骨上方也有一对低矮的棱脊，有着帅气的正面造型。

它们虽然也有“小短手”，但是和霸王龙相比可算是“大长手”——前肢长度是后肢的35%，这要比霸王龙长很多；它们的“手”有三根“手指”，内侧第一根最长，霸王龙则只有两根；它们具有大型的可以大幅弯曲的指爪，很可能是用来钩住东西的。综合来看，在当时的北美洲和非洲，异特龙几乎是没有争议的“霸主”。



异特龙

与马门溪龙生活在同一时代、同一地区的，也有一种凶猛的掠食者——永川龙（Yangchuanosaurus）。这也是一种大型肉食性恐龙，体长估计可达11米，站立时臀高有2.85米，算是“大长腿”。虽然看上去与异特龙很类似，但按照目前的分类，两者并不在一个科[28]。

它有一个又大又高的头，略呈三角形；嘴里长满了一排排锋利的牙齿，就像一把把匕首；脖子可能很柔软；尾巴很长，站立的时候，尾巴似乎可以用来支撑身体。按照分析，它应该是经常出没于丛林、湖滨，生态位可能类似如今的豹或虎。

热闹的天空

这个时期的天空依然被翼龙统治着。不过，与电影中的经典翼龙造型有所不同——它们普遍拥有较长的尾巴，而且末端往往会垂直生长像苍蝇拍子一样的舵状皮膜，主要是用于飞行的时候保持平衡。与鸟类相比，翼龙的头显得更大，有许多大而尖利且向前倾斜的牙齿，身体上覆盖着短短的绒毛。

在侏罗纪晚期的时候，翼龙的体形和现在的鸟类差不多，也是有大有小的。小的翼展可能只有几十厘米甚至十几厘米，大的也有超过一米的。不过，特别巨大的风神翼龙（Quetzalcoatlus），要到白垩纪的时候才会出现（详见第五章第2节）。

在森林里，除了偶尔能够邂逅一些大型恐龙外，也是一个观“鸟”[(29)]的好地方。大名鼎鼎的始祖鸟，它们就在林间散步。虽然有翅膀，但是它们似乎并不擅长飞翔——这些被羽毛覆盖着的生物有些奇怪的特征，有两对翅膀，腿部也发展出了一对后翅。它们前翅的中段依然能够看到前爪，还有一条被羽毛覆盖着的长长的尾巴，这些都让它们与如今的鸟类区别很大。

虽不能确定，在当时的清晨与黄昏，这些类似于鸟类的生物是否也会叽叽喳喳，但是它们多彩的羽毛一定也给当时有些单调的森林增添不少色彩（详见第五章第3节）。毕竟，这时候的花，绝对属于稀罕物。

当然，在丛林里也别忘了找找那些“兽族”的踪影。由于之前已经详细讲过（详见第三章第3节），这里就不赘述了。

小知识点补充

开始变“小”的“大”昆虫

在侏罗纪晚期，或许是因为类鸟恐龙的出现，与这些大型昆虫产生了竞争，昆虫的体形开始逐渐变小。不过，也依然比现在的昆虫要

大上好几倍，虽然没有石炭纪、三叠纪时的那么大。比如，1.5亿年前的远古跳蚤，它们的身长可以达到8～21毫米！这样的身体构造可能允许它们直接在恐龙身上饮血。不过，这一点目前没有直接的化石证据。而且，这个时候叫它们“跳蚤”还稍有些牵强，因为这些小东西并不具有现代跳蚤那样的“善于跳跃的后腿”。它们用于吸血的口器上散布着锯齿状的突出物，这也就区别于现代跳蚤平滑的下颚——它们非常善于撕咬，被它们咬上一口，绝对不是起个痒痒包那么简单了。

侏罗纪的海洋

侏罗纪陆地的探险先告一段落，接下来我们一起探索一下当时的特提斯洋。海洋里的主要物种依然是鱼类，样子和现在差别已经不大。那时候的海里随处可见“菊石”，这种已经灭绝的海洋生物在当时非常繁盛，如今的鹦鹉螺与它们是近亲。那时候还没有鲸类，处于优势地位的是一系列重返海洋的蜥形纲“龙族”，比如鱼龙、蛇颈龙。

说到鱼龙，可不要想象成恐龙的样子，它其实更像是海豚、鲸鱼或者鱼的样子。大一些的鱼龙，个头在10～20米。生活在1.5亿年前晚侏罗世海洋的鱼龙，已经发展成了鱼龙最经典的模样：身体是流线型的，皮肤是裸露的，很适合在水中游泳，它们的鼻孔长在头的上方，嘴里长满了又尖又大的牙，最多可以长出两百多个，眼睛非常大，还长着一种叫巩膜环的保护眼睛的结构，说明水下视力很强。根据化石分析，它们的听力也比其他的“龙族”更好。

在同一时期，在水里还有一类强有力的竞争者也是非常霸气，那就是大名鼎鼎的蛇颈龙。如果说这种水生物没有听说过的话，可能大家听说过尼斯湖水怪的传说（或骗局），无论如何，“水怪”的造型就取材于蛇颈龙。这是一类适应浅水环境的类群，个别种类可以长到18米的体长。它最显著的特点是拥有细长的脖子，有一个非常形象的比喻：蛇颈

龙就像是一条蛇放在了一只乌龟的身体里。是不是让你想到了神话传说中的玄武？

从三叠纪晚期开始，蛇颈龙就出现了，到侏罗纪所处的这个时候，已经遍布世界各地。蛇颈龙和鱼龙一起统治着当时的海洋，不过蛇颈龙出没在浅海，鱼龙则在整个大洋里遨游。不过它们也有天敌——这是蛇颈龙目下面的一种短脖子的分支：上龙。在被正式命名之前，上龙被称作“妖怪”或叫“掠食者X”，名字很酷。在大约2亿～1.45亿年前的侏罗纪，它们是海洋当中顶级的掠食者。它们的血盆大口似乎可以容下一辆小汽车，在它们的食谱当中，似乎就包含着鱼龙和蛇颈龙（这一部分将会在本书第四章第1、2节详述）。

好了，我们的穿越之旅先告一段落。下一篇我们将回到这一章的主线，看看恐龙帝国的结局，以及兽族帝国的复兴之路。

恐龙帝国谢幕，新生代演化竞赛开启

时间来到了1.45亿年前的侏罗纪尾声。

和三叠纪-侏罗纪以大灭绝事件为过渡标志有所不同，侏罗纪-白垩纪的过渡就比较“温和”。说到底，还是因为这些“纪”虽然隐含了“地球历史时期”的概念，但实际所描述的依然是其所对应的地层，这是一个地质学的概念。从地层上看，白垩纪的特征十分明显，正如其名。

很多朋友应该都听说过英国的多佛尔白崖，是英国的形象代表标志之一，而白崖就是白垩纪的标志性地层之一。其岩石的主要成分就是“白垩”——这是一种微细的碳酸钙的沉积物，属于方解石的变种。在过去，是粉笔的主要原料。

白垩纪也是地学史中第一个根据岩性来命名的纪。与侏罗纪汉语名称采用音译不同，白垩纪（Cretaceous）是意译。“Creta”来源于拉丁

文，指的就是前面提到的这种碳酸钙沉积物。

或许你要问：当时发生了什么，怎么会有那么多的“白垩”呢？

这些白垩的来源主要是海洋中一种浮游植物“颗石藻”的钙质外壳微粒。这种藻类在白垩纪的海洋非常常见，直到如今，每升太平洋海水中都有800～5000个，在大西洋的热带海域可以达到300万个，有些时候甚至可以有上千万个[30]。

白垩纪的开始——虽然从岩石标志的角度来看，非常明显和清晰，但由于目前并没有发现“侏罗纪-白垩纪”间存在灭绝事件或者重大的生物演化事件，所以白垩纪的准确开始时间很难确定，误差甚至达到数百万年。

为什么分界明显，却没有“大事件”呢？想象这样一种场景：有一片临近海洋的陆地，随着板块的运动逐渐沉入海底。很久很久以后是不是就有可能沉积了不少“白垩”？千百万年后，这片区域再次沧海变桑田，你会发现什么？

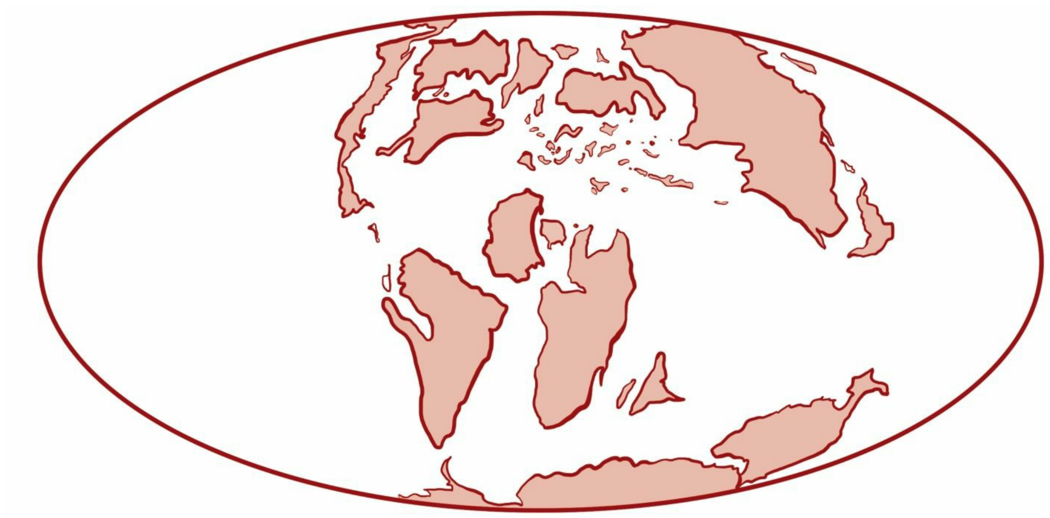
一层非常明显的“白垩层”，据其下端应该就能判断它沉入海底的时间。所以，形成层次分明的岩层，未必需要什么毁天灭地的大事件。而板块运动实际非常缓慢，不同地方沉入海底的时间也各不相同，因此也很难给“白垩纪的开端”确定一个精确的时间了。

白垩纪的环境特点

你应该能看出来，白垩纪的时候，有大量的陆地沉入了海底。之前提过，侏罗纪时超级大陆已经开始分裂，但大体上还是南、北两大部分：北面的劳亚大陆和南方的冈瓦纳大陆。但如今的非洲西北部和欧洲西南部（今直布罗陀海峡一带）仍然时不时地会连在一起，形成一个“南北物种交换”的通道。所以，当时的不少物种都有“全球色彩”。

在侏罗纪的后期，大陆正式进入了大分裂期：原本和非洲连在一起

的南美洲开始顺时针旋转，逐渐远离非洲，在北美与北欧相连的部分则形成了大片浅海。随后，冈瓦纳大陆的北部逐渐从中间裂成两瓣，这就是如今的非洲和南美洲[(31)]。



9000万年前白垩纪晚期的海陆分布

非洲在当时也分成了东、西两部分：从南到北，一条巨大的海峡横贯了如今的撒哈拉沙漠。类似的情况也出现在北美，自北向南，浅而宽阔的海峡将北美洲扯成了东、西两块。上一节提到过，冈瓦纳大陆的东南部，是如今的南极洲和澳大利亚。这两片大陆，先与北方的“非洲”“南美”分开，随后也逐渐从中间裂开，西部成为今天的南极，东部成为澳大利亚。

那个时候，整个西欧几乎都沉入了海底；东欧是一个大岛；亚洲大陆和如今相比最明显的不同是少了南亚——毕竟，那个时候的印度半岛还是个岛，正在缓缓向亚洲漂去（印度板块原本与南极相连）。不过，亚洲的东部则和北美洲连在了一起（在今白令海峡一带）。

想一想：这种情况，除了产生了大片的浅海，还会造成哪些结果？

一方面，大陆都是一小片一小片的，所以应该没什么干旱地带了；另一方面，就是陆地物种之间的联系被逐渐切断了——原本几乎是一个

整体的大世界，变成了一个个小世界[32]。

长期的地理隔绝，也造成白垩纪包括恐龙在内各种陆栖生物的多样性达到了一个空前的繁荣程度。而被子植物的崛起，更是加速了这一过程。单就恐龙来说，当那些营养丰富的“果子”出现后，或许是由于不再需要复杂的消化系统来分解那些“难啃”的蕨类植物或裸子植物，所以许多植食性恐龙的个头比侏罗纪的植食性恐龙小了不少。

说起来，被子植物的崛起本身可能都和恐龙的兴盛有关，有一个假说：正是由于早期的那些蜥脚类巨龙太能吃了，而它们的主食就是当时最普遍的松柏类；此外，到了白垩纪，植食性的鸟脚类恐龙又特别擅长吃低矮植物。你可以理解为：对植物来说，植食性恐龙就是一种“环境压力”。在这种情况下，那些繁殖更快的或者地上部分受损依然可以繁殖的（比如有地下茎）物种就获得了更大的优势。而被子植物的祖先，可能就是这样的。

当植物开花结果后，动物的传粉和播种又反过来促进了被子植物的繁茂。被子植物的繁茂，进一步导致了白垩纪昆虫的再次爆发——蜜蜂的出现，更是让被子植物的花“开出了新高度”。到了白垩纪晚期，被子植物已经彻底取代了裸子植物的优势地位，并且繁茂至今。

无论如何，“超级大陆解体”和“被子植物崛起”这两大事件一同将白垩纪的地球推向了中生代多样化的最高潮：各种各样的恐龙在各地层出不穷，更多的古鸟类开始叽叽喳喳，被鸟类[33]占据中小型生态位的翼龙开始了巨大化，沧龙下海成为新的海洋霸主（详见第四章第2节与第五章第2节）。

总之，这是一个“龙族”全面开花而且极度繁盛的时代，尤其是恐龙——包含鸟类在内，恐龙总目占据了陆地所有阶层的生态位。到了晚白垩世，即使把数量已经极其丰富的鸟类剔除，恐龙的物种数量也达到了有史以来最多。

要知道，“相对隔绝的地理环境”和“开花植物的兴起”所开启的多样化进程，对所有物种而言都是一视同仁的。除了前面说的这些，陆地上，蜥形纲的蛇类和两栖纲的蛙类，以及合弓纲的传承者哺乳纲的数量和多样性也在白垩纪开始爆发式增长。

第三节提到的生活于早白垩世的强壮爬兽，就属于哺乳纲。它们与我们都属于“现生哺乳动物的最近共同祖先的后代”。而目前已知的最早的哺乳动物[34]，在侏罗纪中期就已经出现。之前也说过，在侏罗纪晚期，哺乳动物已经相当繁盛了。到了白垩纪早期，虽然生态位总体都不高，但如今哺乳动物该有的那些特征基本都已经出现。

哺乳动物的牙齿

从化石上进一步看，兽亚纲的哺乳动物祖先有一个关于牙齿的特征开始出现：磨楔式齿。

作为哺乳动物的你咬紧牙关试试！你的上下臼齿是不是可以契合在一起？臼齿这个名字取得非常形象——臼，古代捣药和舂米的工具。不过要完成这样的工作，光有盛东西的“臼”可不行，还需要捣碎东西的“杵”。两者组合在一起，成了一组“杵臼”。

这种上下嵌合的臼齿结构，使得上下臼齿可以互为对方的“杵”与“臼”。好处不言而喻——可以把食物嚼得更碎，或者说，可以最大限度地榨取食物当中的能量。当然，这种优势也一定程度反映出我们的先祖在当时处在食物链中低端的地位。

在第三节登场的好几种“兽族”，其中有几个都可以算作哺乳纲物种。强壮爬兽属于三尖齿兽类（Eutriconodonta）——牙齿上有三个圆锥。

獭形狸尾兽则属于柱齿兽类（Docodonta）——上下牙都很宽，上牙的内外侧都有齿间，下牙也有类似的三角形结构。

会滑翔的那两种兽，属于多瘤齿兽类（Multituberculata）[35]——颊齿演化成了纵向的多排瘤状齿尖，下前臼齿则是带有锯齿的刀刃状，下颌可以前后移动，很适合研磨食物。

有没有注意到：这些分类的关键全都在牙齿上。不像恐龙，动不动就是看“屁股”或者看“脚丫”。毕竟，我们的“兽族”一直以来的优势就是“异型齿”呀。

前面提到的兽亚纲的磨楔式齿，也为日后“哺乳动物的崛起”埋下了关键伏笔。毕竟，这套高级且多样化的加工食物的工具，使得我们哺乳动物祖先具备了“不挑食”的好习惯。试问：在毁天灭地的大灭绝期，什么品质最可贵呢？

兽亚纲物种的分化

“碎裂的大陆”和“被子植物”同样造成了兽亚纲内部的分化及多样化。后兽下纲（后来的有袋类）和真兽下纲（后来的有胎盘类）在白垩纪早期就已经分家[36]。不过要注意的是，根据化石证据，有胎盘类（真兽）并非起源于有袋类（后兽），而是二者共同起源于更早的祖先，后来分别走了不同的演化路线。甚至，根据现有的化石来看，真兽出现的时间可能还早些。

最早的真兽在1.6亿年前的侏罗纪晚期就可能已经出现——中华侏罗兽（Juramaia sinensis），根据其臼齿、前臼齿的数目和齿尖的排列，以及前肢和腕部的特征，科学家将其归类为早期的真兽类。根据骨骼特征，中华侏罗兽应该是一种善于爬树的食虫动物，体重估计为13克左右。



中华侏罗兽

而目前已知的最早后兽类化石发现于中国辽宁，生活在1.25亿年前的白垩纪早期——沙氏中国袋兽（Sinodelphys szalayi），它拥有与如今有袋类动物相似的手腕、踝骨和牙齿，体重在30克左右，而骨骼特征说明它同样应该是树栖的食虫生物。

同样是在辽宁的发现表明，1.25亿年前还生活着一种哺乳动物——始祖兽（Eomaia）。它的个头大不少，体重在200～250克，从牙齿上看应该也是吃虫子的，而骨骼特征则说明它同样适合攀缘。但进一步的化石证据又表明，它可能既不属于后兽也不属于真兽，而是与真兽十分接近的一个演化分支。

总而言之：在白垩纪，哺乳动物的种类其实很丰富，而且真兽、后兽或者与之相近的一些旁支有可能在同一片土地上生活。

不知道你注意到没有，这一部分我都在用“真兽”“后兽”这样的表述。之所以不直接用“有袋类”“有胎盘类”这种更通俗的说法则是因为软组织难以通过化石保存——虽然从骨骼、牙齿上可以判断它们与如今的哪些物种更接近，但我们却没法断定它们是否已经拥有育儿袋或者胎盘。(37)

胎生与胎盘的优势

胎盘给我们带来了哪些好处？这其实可以分成三个问题来回答：胎生的优势和劣势、育儿袋的优势和劣势、胎盘的优势和劣势。

胎生的优势很明显：宝宝在妈妈肚子里发育，妈妈再也不用担心被别人偷吃蛋了。而之前也说过，胎生走的是少生优育路线，这其实有好有坏，毕竟一次能生育的后代数量相对不足。如果生育频率不够高、幼崽存活率不够高的话，种群的扩散能力就相对有限。为了应对这种不足，哺乳动物的母亲就需要花更多精力来照顾幼崽，这也可能为日后的社会性生存打下了基础；此外，这种特性也使得早期胎生哺乳动物在演化上朝着提高生育频率的方向发展。

我们再来看有袋类的繁殖特点：它们的雌性腹部有一个标志性的育儿袋，袋鼠是向前开口的，而考拉是向后开口的。它们的雌性生理结构与我们差别很大，具有双阴道和双子宫，幼体出生时还会暂时在双阴道之间形成一条生殖道。这样的独特结构使得它们可以轮换子宫。也就是说，怀上一胎后还能继续怀第二胎。甚至在泌乳期，也可以继续交配和受孕——这也是它们提高繁殖率的策略。

与有胎盘类相比，它们的幼体都属于超级早产儿——出生时非常小，体表裸露无毛，又聋又瞎。小宝宝依靠嗅觉爬进育儿袋，然后依靠吸食乳汁继续发育。这个过程会持续好几个月，你可以把育儿袋当作一个外置的“子宫”。幼崽如果过早离开育儿袋，在自然环境下则几乎没有存活的可能。

至于胎盘的优势，最直接的就是解决了早产儿的问题。胎盘是处在幼体与母体之间的组织，通过脐带中的血管与幼体连接。宝宝在子宫里能通过胎盘吸收营养排出废物，从而渐渐发育。这就最大限度地防止了早产，幼崽可以在母体内充分发育，往往一出生就具有一定的自主能力[(38)]。但劣势是幼崽在母体长得太大，又会造成分娩困难，这算是胎盘动物的局限性之一。演化上，就需要找好这两者的平衡点。

顺便说一下，与其说胎盘是妈妈长出来的一个“临时器官”，倒不如说是“宝宝和妈妈一起长出来的”——内侧的胎盘胎儿部是由囊胚外膜发育形成，外侧的母体部由母体子宫组织发育形成。所以如果对一个新生

儿的胎盘进行基因测序的话，根据位置不同，会分别测到宝宝和妈妈的DNA。

之所以提这个，则涉及胎盘的起源：根据分子生物学的研究，在胎盘发育的第一阶段，也就是着床开始到孕中期，胎盘细胞首先激活的是哺乳动物和鸟类以及爬行动物所共有的基因。也就是说，在这一阶段，其实本质上和“蛋”没什么区别。在此之后启动的基因才是胎盘类动物所特有的。而根据这条基因线索推测，有胎盘类动物出现这一差异的时间可能在1.2亿年前。而胎盘的本质，可以理解为“一种特殊的羊膜卵”。

胎盘动物的分家

因此，真正意义上的胎盘可能出现在1.2亿年前。虽然，此时距离白垩纪的开端已经过去了2500万年，但由于白垩纪的时间跨度实在太大——约8000万年，所以，这时候依然算是白垩纪的早期。此后的数千万年，随着大陆的进一步解体和开花植物的进一步繁茂，胎盘动物内部也出现了分野：先是北方劳亚大陆和南方冈瓦纳大陆的相对隔离，使胎盘动物逐渐分成了“北方兽”和南方“大西洋兽”两个阵营，时间大约是1.05亿年前[(39)]。

随着南美洲和非洲的解体，大西洋兽又被分成了留在非洲的“非洲兽总目”和南美洲的“异关节总目”，隔着大西洋、两眼泪汪汪，这也是大西洋兽名称的来源。非洲兽总目里，如今我们最熟悉的动物可能是大象，还有土豚以及马达加斯加岛上众多的独特物种。而异关节总目里比较出名的则是树懒。这两个总目，现存的物种都不多。特别是非洲兽总目，别看名字就以为包括了狮子、猎豹、长颈鹿这些著名的非洲动物，其实这些动物都是后来才进入非洲发展的，而它们都是“北方兽”的后代。

北方兽内部也有两大派系。不过与大西洋兽是由于地理隔绝导致的分野不同，北方兽的“分帮”，最初可能是因为生态位的不同。或者通俗

点说：上树的还是打洞的——北方兽逐渐分化出了“劳亚兽总目”和“灵长总目”，时间大约在9000万年前。

要注意，这里的灵长总目，并不单指灵长类，老鼠、兔子、鼯猴、树鼩，都是它们的后代。大致的演化中心，可能是在亚洲地区，最早走的基本是树栖路线。劳亚兽总目现存的后代极其丰富，上天下海穿山无所不能。刺猬所在的真盲缺目，蝙蝠所在的翼手目，穿山甲所在的鳞甲目，猫、狗、狮、熊、海豹所在的食肉目，犀牛和马所在的奇蹄目，猪、牛、骆驼、鲸鱼所在的鲸偶蹄目，全是它们的后代。

回顾白垩纪哺乳动物，尤其是胎盘类哺乳动物的分化，我们可以发现：在恐龙帝国达到巅峰的白垩纪，“苟且偷生”的哺乳动物内部其实已经悄悄做好了准备，为日后再度复兴“兽族帝国”储备了充分的多样性。

可以说，一切就绪，只等一场大灭绝了！

白垩纪-第三纪灭绝事件

之前说过，大约在距今6600万年前的白垩纪末期，一块大约有一座小城镇大的小行星，撞击在了如今墨西哥尤卡坦半岛的东北角，成了压垮恐龙帝国的最后一根稻草，也正式宣告了中生代的结束。

这次全球浩劫，使得非鸟恐龙、翼龙全部灭绝，同时还带走了75%的鸟类。这次的打击虽然主要针对陆地，但水中的大块头，比如蛇颈龙和沧龙这样的大块头，也全部灭绝。除了部分鸟类幸存外，“龙族一脉”还有鳄类（约36%灭绝）、龟鳖类（约27%灭绝）、有鳞类（蜥蜴和蛇，约6%灭绝）的情况好一些。这些物种也奠定了如今爬行纲的基本面貌。

“兽族”一边，其实也同样损失惨重——只有原兽亚纲、兽亚纲和多瘤齿兽类幸存。在兽亚纲中，有袋类损失较大，灭绝了约75%的物种；有胎盘类则有84%得以幸存。这样算下来，有胎盘类的损失算是转小的

了[40]。

至于背后的原因，物种体形可能是主因之一。有这样一种说法，当时凡是体重超过25千克的陆地物种，无一幸免。此外，食谱广泛、繁殖频率高、后代存活率高等因素，可能也是物种得以幸存并迅速扩散的原因。

小个头恐龙为何灭绝？

有没有想过：为什么除了鸟类以外，其他恐龙也全部灭绝了呢？毕竟，恐龙的个头也有大有小。

一方面，在白垩纪晚期，中小型的生态位中其实已经挤进了很多其他类群的动物。这其中，既有部分哺乳动物也有恐龙的后裔鸟类。而那时候的鸟类也不全是会飞行或善于飞行的，有不少是类似如今的家鸡这样的走禽。所以，当时的鸟、哺乳动物和“非鸟恐龙”的生态位存在诸多重合。

所以，在白垩纪晚期，小体形的恐龙，从物种数量上说，已经有衰退的迹象。或许有一些类似鸟的带有羽毛的恐龙活过了大灭绝，可此时，面对繁殖更快的鸟类和哺乳类，可能很快就败下阵来，渐渐消亡[41]。虽然这一过程可能持续了数万年，但从地质视角回望，不过是一瞬间而已。

鸟类中也有若干派系，在白垩纪占据优势地位的并非如今鸟类的祖先，而现今所有鸟类的祖先在当时可能都是不善飞行的小个头走禽。不过，地面上相对恶劣的生存环境可能也让它们往“快速繁殖路线”发展——几个月就能长大成鸟。也恰恰是这种迫不得已才发展出的能力，使得这些鸟类幸存者在大灭绝后迅速发展，沿着先祖的道路再次飞向蓝天。

新生代

6600万年前的大灭绝，为中生代画上了句号，也正式拉开了新生代的序幕。焦土之上，百废待兴。

不知道你会不会有这样一个疑问：当时的陆地上，幸存下来的小家伙其实并不少，为什么最后是哺乳动物全面开花？毕竟，蜥形纲“龙族”的后裔，虽然损失惨重，但好歹也有鸟类、蜥蜴、蛇、鳄、乌龟得以幸存。

蛇和乌龟这种过于特化暂且抛开不谈，毕竟这种特化的造型使得它们很难再拓展出更多的生态位。但剩下的“龙族”呢？鳄则属于“祖上阔过”的；鸟类则属于相对先进的后来者，而且当时剩下的也基本都是地上跑的了；还有蜥蜴，这不是和“龙族”的早期祖先长得差不多吗？

照理说，大灭绝是让大家重新回到起跑线，感觉这时候机会对幸存物种来说应该是比较公平的。其实，这些物种在“征服陆地高阶生态位”的道路上也并非毫无斩获。若是把“成为当时陆地的顶级掠食者”看作成功的标志的话，前面这几家在新生代，其实都有不错的战绩。以鳄鱼为例，在我国的古新世[42]地层，发现过一种适应陆地生活的鳄鱼——平顶鳄（Planocrania），体长可达3米，有适合奔跑的长四肢、密集的小锯齿，十足的陆行杀手派头。同样，在始新世的中亚、欧洲和北美，也活跃着另一种体长3米左右的陆生鳄——跑鳄（Pristichampsus）。可见，在没有了恐龙之后，鳄鱼家也进行过收复陆地的尝试。在中新世中期（约1500万年前）的南美，还生活着一种体长达8米的陆生鳄鱼——巴里纳斯鳄（Barinasuchus）。

是不是有种梦回三叠纪的“既视感”？

由于在很长一段时间处在相对与世隔绝的状态，那时候的南美洲可以说是怪兽频出。即使是蛇，在6000万年前的古新世，也出现过极端巨大化的类型：泰坦巨蟒（Titanoboa），体长达到13米、体重超过1吨，身体最粗的地方可能将近1米。这恐怖的怪兽在当时可能以鳄鱼为食！



泰坦巨蟒

即使是原本不起眼的蜥蜴，在新生代也有长足的进步：澳大利亚就生活过体长可能接近7米、体重超过半吨的古巨蜥[43]，即使在如今印度尼西亚的科莫多岛上，也依然生活着它们的近亲——科莫多巨蜥，其体长可达4米，嗅觉敏锐、下颚能分泌毒液，绝对是可怕的杀手。

至于鸟类，除了飞向蓝天，面对陆地上空出来的大把生态位，它们自然也不会放弃。在大灭绝结束后的前1000万年，其实有一个“巨鸟横行”的时代。在德国和美洲，都发现过生活在这一时期的冠恐鸟（Gastornis），巨大的头和喙，2米的站立高度、190千克的体重，是不是已经有了恐龙前辈的意思？不过，它们在欧亚大陆存在的时间并不久，到了始新世，在与哺乳动物和鳄的竞争中逐渐落败。



泰坦鸟

说起巨鸟，更有代表性的则是一度称霸南美的骇鸟（Phorusrhacos）[44]——大约兴起于6200万年前，一直生活到了10万年前。它们可能起源于欧亚大陆，最开始并不大，后来到达美洲并一路南下到达南美。它们站立时的身高超过2米，巨大的鸟喙前端还有锋利的弯钩。甚至到了后来的南北美物种大交换时，还一度北上去到北美，发展出泰坦鸟（Titanis）这种高达2.5米，身体粗壮、头颅巨大，不输剑齿虎的怪兽！

在人类抵达前几乎没有哺乳动物[45]涉足的新西兰，更是鸟类的天堂。那里的恐鸟（Dinornithidae）一直等到了人类的抵达，虽然它们是素食主义者，但并不妨碍它们的巨大化之路——有记录的最大个体达到了3.6米高、250千克重。

类似的孤岛，还有马达加斯加。缺乏强有力天敌的象鸟（Aepyornis）也有3米高，体重更是接近半吨。人类最后一次看到活着的象鸟是1649年，但没过多久，它便死在了当地人手上。

“兽族”的制胜法宝

你或许也注意到了，凡是没有被哺乳动物，尤其是没怎么被有胎盘动物涉足的地方，总会被“龙族”钻空子。[46]但一旦这地方与有胎盘动物发生了交集，食物链的顶端往往就是“兽族”。这还只是以“顶级掠食者”这一标准来衡量成功与否的，若是考虑生态位的多元、物种的多样，毫无疑问，新生代属于“兽族”。可这背后的法宝又是什么呢？

想想看，从这个系列的一开始就强调的，哺乳动物和其他物种的一个关键差异是什么？

牙齿！或许正是我们的牙齿和颌部的复杂结构，赋予了我们极其出色的适应性——在恐龙退出历史舞台后，我们这“善变”的“异型齿”演化到了前所未有的高度。针对不同的环境或食性，不同的哺乳动物分别演

化出了形态各异的牙齿，从而迅速适应环境。

以树叶和灌木为食的，发展出了丘型齿；以草为食的，发展出了月型齿[47]；啮齿动物则长出了锋利且不断生长的门齿。伴随着食草动物越来越多，食肉的哺乳动物也快速兴起。与之相配套的牙齿，既有锋利的犬齿，也有演化成了锋利裂齿的臼齿，可以更好地撕咬猎物。

对于哺乳动物来说，这是一个攻城略地的大发展期。在晚白垩世时，哺乳动物共有10多个科，到了古新世时已经逐渐增加到40多个科。

再想想鸟类呢？在恐龙时代，为了适应飞行，鸟类逐渐放弃了牙，外加特化为翅膀的前肢、短小的消化系统，可能都是鸟类逐渐退出陆地舞台的原因。虽然基因的突变，有可能使某种已消失的性状以另一种方式失而复得，但在百废待兴的新生代初期，所有物种都在“疯狂赛跑、攻城略地”，这种劣势就有可能逐渐被放大。

还有个角度则是从基因差异层面出发的：某种意义上说，现存鸟类间的基因差异甚至还不如哺乳动物中的一个目。从全体物种这一高度看，这种基因多样性的缺乏，可能就意味着整体的应变能力较弱，这可能也一定程度地限制了它们在陆地与其他物种的竞争。至于鳄、蜥蜴和蛇，则可能由于是变温动物，局限了它们拓展更多的生态位。

小知识点补充

后来的故事

分散在四处的胎盘动物先祖开启了新生代的演化竞赛：它们中的许多，从夜晚来到了白天，从树上和洞里跑到了地面。青青的草原或许是它们兴旺的福地——浮夸的造型千奇百怪，凶猛的野兽一代强过一代。它们中的有一些，选择了下海，成为海洋新的霸主；也有一些，终于学会振翅高飞，成为暗夜里的飞行者。大约5000万年前，亚

洲某处的树梢上，一种小巧的食虫动物逐渐演化成了灵长类。此后的1000多万年，它们逐渐进入非洲。接下来的3000多万年时光，一批又一批的灵长类后代出走或归来。直到几万年前，一种名为“智人”的灵长类从非洲开始向全球扩散。这才有了今天的我们——可以回望并诉说这“兽族崛起”的故事（详见本书后三章）。

---

(1) 关于颞颥孔的作用说法不一，通常认为是减轻头骨的重量，以及用来附着咬合肌，使这类动物更具咬合力。

(2) 目前全球年平均气温约为15℃。

(3) 想一想，作为哺乳动物的你，是躬身的幅度大还是侧弯的幅度大？再想一想鲸鱼、海豹这些海生哺乳动物的游泳姿势。相比之下，鳄鱼或者恐龙是不是在水平方向上更容易弯曲脊柱？

(4) 水龙兽通常被用作大陆漂移说的佐证，证明在2亿年前各大陆是互相连接 的。

(5) 原因与超级大陆的拼合有关。从海洋上吹向大陆的水汽根本无法深入超级大陆的内陆，因此便存在着异常广袤的沙漠。由于大陆连成一块，海洋也很难形成复杂高效的洋流，这进一步减少了海洋信风的形成——没有大风，云中的水也送不进内陆。因而，当时全球的植被覆盖率也显著下降，进一步导致大气氧含量的降 低。

(6) 二叠纪末期大灭绝，造成地球含氧量断崖式暴跌。

(7) 卡尼期（Carnian　Age），是晚三叠世的第一个阶段，时间跨度大约是距今2.37亿～2.27亿年。具体到卡尼期洪积事件，则在距今2.34亿～2.32亿年。

(8) 更严谨的表述应该是，三角龙、梁龙、麻雀的最近共同祖先，以及这个祖先的所有后代。

(9) 鱼龙虽然也是正统的“龙族”（蜥形纲）后裔，不过和鳄鱼、恐龙、翼龙相比，鱼龙分家自立的时间更早些。

(10) 比如，非洲狮和猎豹，各有所长，各取所需，即使生活在同一片草原，也照样相安无事。

(11) 化石发掘于波兰的利索维斯村，由此得名。

(12) 虽然上一节说过，“兽族”很早就站了起来。但你可以理解为它们站得还不够彻底，比如二齿兽类的前肢是侧着从身体向外伸出的。

(13) 你可以称它们是“蛇族”，因为它们的后裔中包括了蜥蜴和蛇，以及中生代后期的“海洋扛把子”苍龙。

(14) 根据化石出土的地点和年代，它们极有可能存在交集。

(15) 原鳄亚目这一支，后来就发展出了现代鳄鱼。

(16) 母乳是通过皮肤上的毛孔流出的，幼兽舔食积聚在母兽腹部的乳汁。毒针是由空心骨头构成的武器，内部存有毒液，可以用来攻击敌人或者杀死小型动物。

(17) 新几内亚岛也有分布。

(18) 卡岩塔兽，就是之前说过的犬齿兽在侏罗纪的后裔之一，属于三瘤齿兽科（Tritylodontidae）。

(19) 最早的盘龙目，因为找到了蛋，所以可以明确是卵生。但后来的兽孔目，就是因为缺乏这种可以盖棺论定的直接证据，只能靠推测。

(20) 想一想，鳄鱼、蛇、青蛙、鸟、鲨鱼都是怎么吃东西的？再想想，人、老鼠或熊猫又是怎么吃东西的？

(21) 发现于辽宁凌源，早白垩世，多瘤齿兽类（Multituberculates）。

(22) 属于柱齿兽目，被认为是最早适应水生环境的合弓纲物种，这是哺乳动物很亲近的旁系。獭形狸尾兽类又是柱齿兽目中最繁盛的种群。

(23) 关于它们灭绝的原因众说纷纭，可能的原因是在与哺乳形类的竞争中落败。

(24) 发现者是渤海大学古生物中心的韩庚教授，故名。

(25) 有理论推测梁龙有一个长鼻，但缺乏有力的证据。

(26) 1952年，金沙江马鸣溪渡口修筑公路，开凿岩石的时候发现有很多像骨头一样的石头，古生物学家杨钟健教授认为这是一种新的恐龙化石，于是就给这种恐龙取名马鸣溪龙。杨教授是陕西人，定名之后，其他研究人员因为杨教授的口音误把这个马鸣溪龙听成了马门溪龙。所以，马门溪龙就出现在了各种文献上，后来就将错就错了。

(27) 根据推测，极限体形或许能达到13米。

(28) 但均属于异特龙超科。

(29) 这里指的都是类似于鸟的恐龙。一般认为，真正意义上的鸟在这个时候应该还没有出现，如果要看早期的鸟的话，恐怕得再等几千万年，要到白垩纪。

(30) 颗石藻的多少，与气候相关，因此科学家可以用来复原古气候。甚至还能从这种微粒的溶解情况来判断当时的水深和水温。

(31) 还记得当年魏格纳在病床上看出来的轮廓吗？

(32) 如今的澳大利亚，之所以能够保留那么多独特的有袋类动物，恰恰就是因为长期的地理隔绝——物种只需要根据当地的环境“内部”竞争逐渐演化，而不需要面对外来的“入侵”。而白垩纪类似的情况可能更多。

(33) 此处还包括那些类似于鸟的手盗龙类恐龙。

(34) 中华侏罗兽（Juramaia sinensis），详见后文。

(35) 整个多瘤齿兽类也被称作“中生代老鼠”，根据推测应该是植食性为主，生态位与鼠类接近。和如今的老鼠一样，这个哺乳纲的分支在当时也是非常兴盛。顺便一提，它们也是除了原兽亚纲和兽亚纲外唯一活过白垩纪大灭绝的哺乳动物分支。

(36) 原兽亚纲和兽亚纲早在侏罗纪就已分化。

(37) 比如前面说的与真兽接近的始祖兽，它的狭小臀部显示它会生出幼兽，但却又没有完全发展，不像是能拥有完整胎盘的样子。

(38) 人类这种早产儿除外。另外，其实有袋类的母体中也有初级的胎盘，但却没法如我们这样维持到幼崽发育成熟。

(39) 这期间，在胎盘动物还没来得及到达“南极-澳大利亚板块”时，这部分大陆又和冈瓦纳大陆分离。所以，先期到达的有袋类和更早的原兽亚纲（单孔类的鸭嘴兽这些）得以乘着这艘巨轮逐渐远离“中心世界”独自发展。这就是“澳大利亚的动物为什么那么特别”的原因。

(40) 相比之下，鱼类只有约15%消失，生活在水岸或水中的两栖动物，则全部幸 存。

(41) 还有一种假说，裸子植物的式微可能也加速了白垩纪中晚期植食性恐龙的衰落，被子植物中各种植物碱的含量往往高于裸子植物，恐龙的消化系统可能并不适应，这一情况或许也影响到了中小型恐龙。

(42) 距今约6500万～5300万年。

(43) 根据原住民传说，这一物种可能一直活到了智人抵达。

(44) 也常被译作恐鹤、曲带鸟。

(45) 除了一些小型蝙蝠。

(46) 南美洲一度是有袋类的天下，新生代早期，原生的有胎盘类并不如有袋类繁盛。有袋类也出现过中大型的顶级掠食者，比如生活于中新世中期至上新世末期南美的袋剑虎（Thylacosmilus），一种酷似剑齿虎的有袋类，身长2米，体重250千克，已经接近老虎的体形；上新世至更新世的澳大利亚则生活着袋狮（Thylacoleo），体重也有100千克，且咬合力堪比狮子。

(47) 补充一个环境条件，草地的大量出现取代原有的热带森林，也使得更能适应吃草的哺乳动物得以快速扩张。如果恐龙灭绝是“天时”，那植物面貌的改变则可能是“地利”。

第四章　海洋陆地来回折腾：深渊帝国的王位轮替

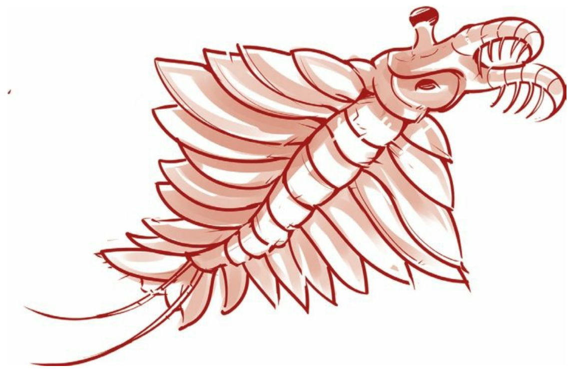
不知你有没有与我类似的经历。乘船在大海上航行，夜幕降临，扶着栏杆探头凝视着滚滚的波涛，恐惧会立刻涌上脑门。漆黑的水面下，到底是一番怎样的世界？深渊之中，又有多少未知？会不会，突然有个巨大的怪物将我吞噬？每每想到这些，我便会缩回身子，赶紧钻进温暖的船舱。作为大海的后代，我们却对海洋心生畏惧。当然，考虑到一代代大海怪——海洋顶级掠食者的存在，也许这种恐惧本就是应该的。

原住民的进击和归来的王者

在前一章，我们认识了陆地上一代又一代的顶级掠食者。接下来的部分，我们就看看历史更悠久的海洋生态系统，都经历过怎样的“王位轮替”。由于更早时代的生命形态还不那么丰富，因此我们的第一站还是先回到刚经历生物大爆发的寒武纪。

寒武纪

在5.3亿年前的寒武纪海洋里，最凶猛的捕食者莫过于奇虾（Anomalocaris）。虽说它们的名字里有个“虾”字，但是它们和我们现在吃的虾，除了长得有几分神似之外，并没有什么关系。它们有一对带顶的巨眼、一对分节的用于快速捕捉动物的巨型前肢，还拥有美丽的大尾扇和一对长长的尾叉，这些特征赋予了它们快速游泳的能力。奇虾的个头并不小，光是嘴的直径就达到25厘米，嘴中还有环状排列的外齿，这就对那些拥有矿化外甲的动物构成了重大威胁——在寒武纪的海洋，奇虾可以随意挑选它们的猎物。



奇虾

当时的海洋生物主要依靠坚硬的外壳保护自己[(1)]，而专为掠食甲壳动物定制的这套身体装备，就让奇虾占据了海洋生物链的最顶层。目前有记录的最大奇虾个体，体长超过两米。要知道，那时大部分动物的个头都在几毫米到几厘米。即使是处在当时食物链第二位的肉食动物，体长也只有约30厘米[(2)]。

奥陶纪

奥陶纪海洋的王者，如今听起来似乎有点“人畜无害”——鹦鹉螺（Nautiloidea）。虽然这种动物如今依然在海中游弋，但你可别把它们与海螺混为一谈。海螺在分类上属于腹足纲（Gastropoda），这也是软体动物中最为繁盛的一类，蜗牛、田螺、扇贝、鲍鱼，都是腹足纲的成员。而鹦鹉螺则属于头足纲（Cephalopoda），这一纲里大家更熟悉的物种应该是章鱼和乌贼。

在奥陶纪，海洋无脊椎动物进入了“鼎盛时期”。头足纲与腹足纲的物种也迎来了大发展期。根据现有的化石证据，生活在奥陶纪的一种巨型鹦鹉螺（Orthocone），恐怕是“打遍海下无敌手”。它们的体长达到11米，软体居住在一个长且薄的圆锥形壳里，就像是一柄长枪，沿着它的下腹部有一根柔韧的圆锥形肉制管子——鹦鹉螺利用这根管子吸进海水，再施加压力从反方向排出海水，从而到达想去的任何地方，就像是水火箭。它们还能调节壳中小室里的水量，以此来控制垂直方向的位

置，类似于潜水艇。它们还有灵敏的嗅觉和凶猛的嘴喙，也难怪三叶虫、海蝎子[(3)]这样的节肢动物，都能成为它们的美餐了。

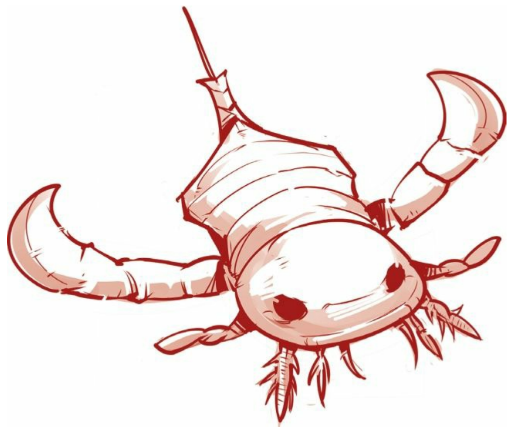


巨型鹦鹉螺

志留纪

不过，软体动物称霸的时代并没有持续太长，巨型鹦鹉螺的好日子很快也就到头了。到了志留纪，鹦鹉螺逐渐沦落，反倒成了它曾经的食物之一——海蝎子的猎物了。这时候的海洋中，更出现了一种似乎只有在恐怖片里才能见到的巨型海蝎子——广翅鲎，它有一辆轿车那么大，体长2～3米，从头到尾装备着厚实的装甲，还有一对巨大的钳子。而它的出现，也标志着节肢动物[(4)]最辉煌的时代来临了。

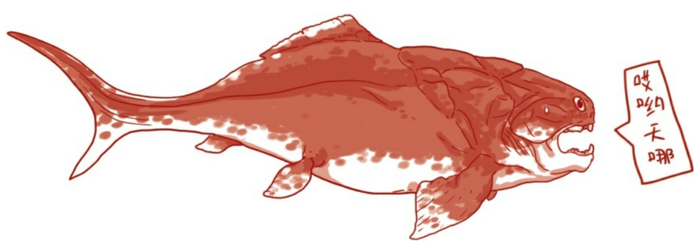
广翅鲎经常隐藏在海底的泥沙中进行伏击，似乎没有什么猎物能逃脱它的巨钳。在志留纪，它们是绝对的海洋霸主，能杀死它们的恐怕只有自己的同类了。在那个时代，我们的脊椎祖先只能在巨鲎们的阴影下苟且偷生——此时，真正意义上的脊椎动物才刚刚开始起步。不过也不要着急，脊椎动物的春天马上就要到来。



广翅鲎

泥盆纪

泥盆纪的海洋已经属于鱼类。到了泥盆纪晚期，出现了一种可怕无比的大鱼——邓氏鱼（Dunkleosteus），它是恐鱼科（Dinichthyidae）的代表性成员，这是一种拥有惊人咬合力的巨型食肉厚皮鱼[5]。最著名的一种叫泰雷尔邓氏鱼（Dunkleosteus terrelli），体长约11米，体重估计有6吨，在它们的菜单中既有鱼类也有各种无脊椎动物，甚至还可能包括早期的鲨鱼！是的，鲨鱼真的非常古老。不过，邓氏鱼的好景并不算太长，它们的王朝止步于第二次生物大灭绝（详见第二章第2节）。作为脊椎动物的我们，则可以庆幸这一点：泥盆纪开始，海洋食物链的头把交椅就再也没有从脊椎动物手里腾挪过。

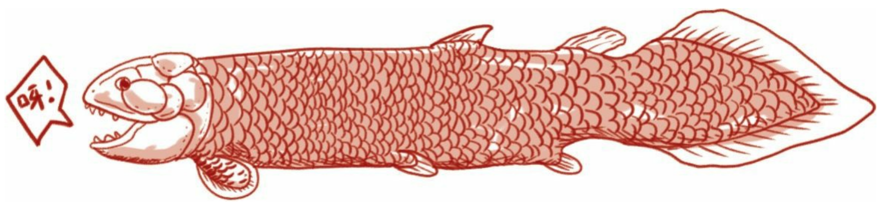


泰雷尔邓氏鱼

石炭纪

在石炭纪这个陆生动物飞跃发展的时代，接下来这位霸主也挺符合

当时的大环境，严格来说它不是“海怪”，而是“水怪”。因为，我们的霸主生活在江河湖沼这样的淡水环境里——根齿鱼（Rhizodus），顾名思义，这种史前鱼类长着“根一样的牙齿”，它们是石炭纪淡水的恐怖支配者。根齿鱼中最具代表性的希氏根齿鱼（Rhizodus hibberti），最大个体超过7米长，体重估计有两吨。它们所保持的“最大淡水肉食鱼类纪录”，至今都没找到几位竞争者。它们会对一切出现在自己视野中的动物发起攻击，无论是鱼类还是两栖动物[6]。



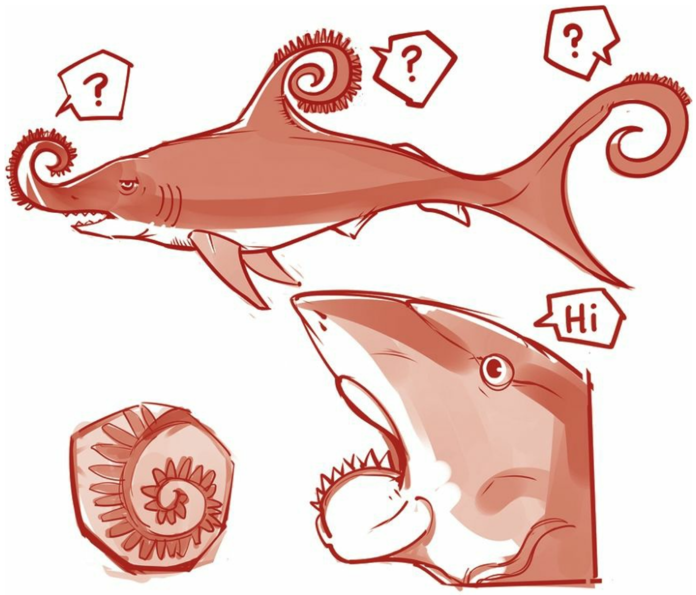
根齿鱼

之所以选出这位“水怪”作为石炭纪的代表，是因为在当时海洋中似乎并没有什么令人惊骇的大家伙。如果真要选的话，在当时的海洋中生活的剪齿鲨（Edestus），可能已经游到了食物链的顶端。只可惜，目前对这种生物的认识仅仅来自牙齿[7]。根据推测，它们的体长可能已经达到了6米。如果真是这样，那应该能算是石炭纪的“海王”了。

二叠纪

毫无疑问，二叠纪海洋霸主的位置已经可以肯定属于鲨类了——旋齿鲨（Helicoprion），helico源自希腊语“螺旋状”，prion则源自“锯”，组合起来是“螺旋锯”。目前为止，我们还没有发现过完整的旋齿鲨骨架，只找到许多螺旋排列的牙齿化石。但也正因如此，关于旋齿鲨的真正模样，一直以来也是古生物学家和爱好者津津乐道的话题。目前找到的最大的牙齿化石，长度为19～37厘米不等，科学家因此估计，旋齿鲨的个头可能已经超过10米，甚至接近20米。如果真有这个体形，问鼎二叠纪的海洋，应该是足够了。至此，脊椎动物的先行者——鱼类，已经在海

洋里称霸了三个纪。



旋齿鲨

至此，整个古生代的“海中王者”就和大家盘点得差不多了。从接下来的三叠纪开始，海洋中迎来了一批又一批的“外来者”，或者说是“归来者”。这些原本在陆地生活的家伙，因为各种各样的机缘，重新回到海中生活，并且接替了鱼类，成了海中新霸主。而且，除了些许“大灭绝事件”过后的空当，海洋食物链最顶端的位置，几乎全被它们所占据。下一节开始，我们就好好来看一看，这些家伙所谱写的——陆与海之歌！

小知识点补充

什么是生态位？

俄罗斯有一位微生物学家叫格乌斯，他把双小核草履虫和大草履虫这两种生物，分别放在两个相同浓度的细菌培养基当中。几天之后，这两种生物的种群数量增长趋势都呈S形曲线。接着，他又把这

两种生物放入同一环境当中继续培养，并且控制一定的食物。有意思的是，16天之后，培养基中就只剩下双小核草履虫，而大草履虫却消失了。

格乌斯对整个过程进行了仔细观察，他没有发现有一种虫子去攻击另一种虫子的现象，也没有看到两种虫子会分泌出什么有害的物质，一种把另一种给毒死。他只发现，双小核草履虫在与大草履虫竞争同一食物的时候，增长得比较快，所以最终就将大草履虫赶出了培养基。

格乌斯又做了一个相反的实验，把大草履虫与另一种袋状草履虫放在了同一个环境中进行培养。结果这两者都存活下来了，而且最终还达到了一个稳定的平衡水平。可这又是为什么？原来，虽然这两种虫子也在竞争同一种食物，但是袋状草履虫需要的部分并不是大草履虫所需要的。好比张三和李四都喜欢吃肉，但张三喜欢肥肉，李四喜欢瘦肉。

于是格乌斯通过实验提出了这样一种设想：如果两个竞争种能共存于同一生存环境之中，那么它们一定是“生态位”分化的结果。也就是说，它们的生态位之间存在着一些错位。如果没有这种分化，或者生存环境使这种分化变得不可能，那么一个竞争种将会消灭或排除另一个竞争种。生态位分化是由于竞争，竞争个体各自从其部分潜在的生存和发展区退出，从而消除生态位的重叠，最终实现稳定的共存。这就是“格乌斯原理”，也叫“生态位法则”或“价值链法则”。

这个法则也可以用来解释“为什么陆生动物会重返海洋”：当海洋当中的某些生态位空出来的时候，就会有一些其他的生物伺机而动，去占据那些空出来的名额。只要时机合适，这些竞争者的祖先既可以来自海洋，也可以来自陆地，甚至来自天空。一开始，这些外来者未必就胜过“海中原住民”，在演化之路上一定有许多的失败者，也会有不少没有登上食物链顶端但也找到了自己生态位的物种。只不过，由

于“幸存者偏差”的缘故，我们更喜欢谈论的是鱼龙、蛇颈龙、上龙、沧龙、鲸鱼这样成功的顶级掠食者的故事罢了。别忘了，即使在如今的海洋，也依然有海龟、海蛇、海豹、海狮、企鹅在畅游。

“龙族”重返海洋，放弃与进化之途

和登陆一样，重返海洋的动物在很多情况下也是被逼无奈。而它们最终是否能够游到海洋食物链的最顶端，则得看它们的造化——或者说有没有空余的生态位可以让它们填补，又或者它们的祖先是否留给了它们重新适应海洋的潜力。

与陆地上的争霸故事类似，重返海洋的动物们也可以分为蜥形纲的“龙族”和合弓纲的“兽族”这两大阵营。简单来说，中生代的海洋为“龙族”所统御，新生代的海洋则是“兽族”所称霸。所以，我们的这段“陆与海之歌”就先从“龙族”的故事开始说起。让我们再次把时钟拨回到二叠纪尾声的那场超级大灭绝。

初试下海

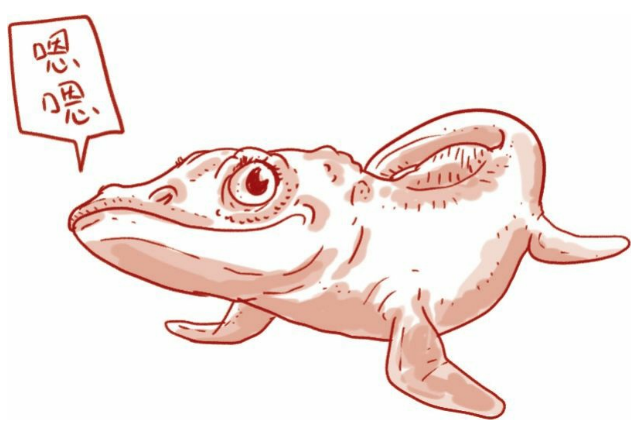
灾难过后，水中的那些大佬也都没能幸免。相信你也一定明白这个道理了：在太平盛世，巨大的体形，往往能带来不少生存上的优势，可一旦到了乱世，它的副作用也就异常明显了——只要供养自己的食物链当中某几环出了问题，自己的厄运也就随之降临了。

灾难过后，幸存下来的那些生物，往往都是个头不是特别大的那些，在这样的环境当中，艰难地求生并且繁衍，机会也由此而来。有一个“龙族”的分支，或许是陆地上能够供养它们的东西在当时实在是太少了，又或许是近海里原本的那些可怕杀手鱼都消失了，总之，这些个头不大，更像是如今蜥蜴的爬行动物，就开始到浅海里找生活了，这便是

早期的鱼龙超目（Ichthyopterygia）物种。它们的生活方式可能类似今天的海豹——它们的四个鳍脚应该能兼顾划水和爬行。在东亚、北美、北欧的三叠纪早期地层中都找到过这类物种的化石。

比如，在我国安徽巢湖发现的柔腕短吻龙（Cartorhynchus lenticarpus），是目前已知的最早的鱼龙，生活在早三叠世。它们的个体非常小，只有40厘米长，很难和后来出现的那些巨无霸鱼龙相比。头骨比较宽阔，也没有后期鱼龙所普遍具备的长吻。它们没什么牙，却有粗壮的舌颌骨——根据推测，它们能够在取食的过程当中，通过肌肉运动使整个口腔的空间迅速增大产生负压，将食物吸进去。

它们仍然保留着四足类的指骨，不过四肢已经呈现出了鳍状，表明它们已经开始适应水生环境了。之所以认为它们并没有完全下海，也是基于化石证据："柔腕"指的就是它们腕部软骨的发育类似"鳍脚类"[8]，表明它们腕部的灵活度比较高，所以具有一定的陆地爬行能力。而且，它们的前肢中部强烈地向前弯曲，类似陆生爬行动物，具有支撑和承重的作用。



柔腕短吻龙

卵胎生

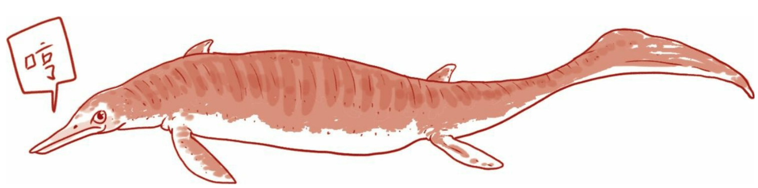
鱼龙既不是卵生，也不是胎生，而是卵胎生。通俗地说就是它们在体内孵卵，而宝宝离开母体的时候已经发育得较为成熟，所以看上去又

像是胎生。卵胎生和胎生最关键的区别在于：宝宝发育时所需要的营养依旧是靠卵自身所储存的卵黄，它和母体并没有物质交换[9]。通俗地理解就是没有脐带，只是卵的孵化场地在母体内。这种情况在如今的动物界也并不稀有。比如说蝮蛇、海蛇、鲨鱼、大肚鱼等，都属于卵胎生的动物。

至于卵胎生爬行动物起源的内在机制，现在还处在假说阶段。但无论哪种观点，都认为“热需求”是重要的选择压力。通俗来说，母体内的环境温度，相较于外界，会更加恒定，这无疑更有利于胚胎的孵化。考虑到陆地环境的温度波动会显著地大于海洋环境，因而，科学家也推测，鱼龙的卵胎生行为，更有可能是起源于陆地。

虽然说后来的三叠纪被认为是一个炎热干燥的时期，但是二叠纪末期形成的岩石显示，当时某些地区的气候变得非常寒冷，在地球两极也形成了大冰盖。这些巨大的白色冰盖将阳光反射回天空，会进一步地降低全球的气温。这或许是鱼龙卵胎生起源的可能原因——根据现有的化石证据，早在2.5亿年前的三叠纪早期，鱼龙就已经是卵胎生的了。

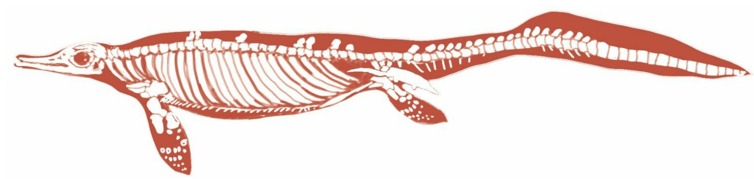
作为三叠纪鱼龙的重要产地，安徽巢湖出土的更为出名的早期鱼龙化石则是巢湖龙（Chaohusaurus）。它们拥有与柔腕短吻龙都处于鱼龙演化支的基干部位，不过巢湖龙的身体形态已经更适应水生环境，体长也超过了1米。巢湖龙化石中有一件非常珍贵——十分难得地把鱼龙妈妈生育的瞬间给定格了下来。



巢湖龙



巢湖龙化石



巢湖龙宝宝正在离开母体

在鱼龙妈妈的肚子里有一条还没有出世的小鱼龙胎儿，另外一条已经有一半的身体从骨盆里露出来，还有一条小鱼龙则已经完全脱离了母体。最让科学家感兴趣的是那条正在出生的小鱼龙：它是头朝外出来的。而在此前发现的后期鱼龙的分娩化石，则都是尾部朝外出生的[(10)]。科学家推测，这可能就意味着巢湖龙是在陆地出生的，否则的话，刚出生的小宝宝极有可能被水呛死。考虑到巢湖龙依然具备一定的陆地生活能力，我们如今或许可以这样推测：鱼龙在陆地时已经具备了卵胎生的特点。早期的鱼龙，是在岸上产崽，类似如今的海豹，到了后期才逐渐像海豚那般终生在水中生活。

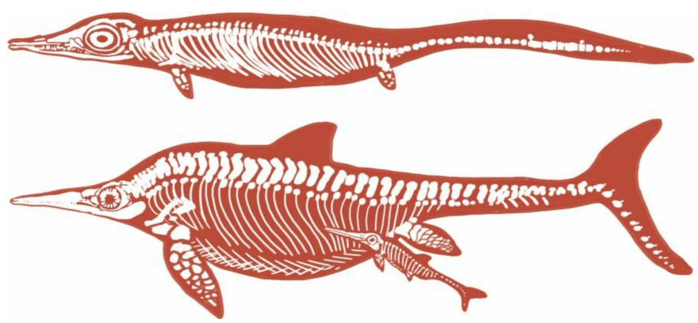
鱼龙王朝

这些半水半陆生活的鱼龙，后来又经历了些什么，最终才变成海中巨无霸的呢？要回答这类问题，依然需要结合当时的大环境来看。

在上一章曾经提过：三叠纪早期，超级大陆已经形成，相应的则是一片极其浩瀚的、横跨两万多千米的超级大洋。简单地换算一下你就能

知道，当时的海岸线会比如今的短许多。这一因素可能就迫使一部分早期鱼龙开始尝试彻底的水中生活——刚巧，这时候的海洋中也没什么特别厉害的角色。

从化石证据上也不难看出，一部分鱼龙先祖最终选择了彻底放弃一会儿在岸上一会儿在海里的生活，真正意义的鱼龙目（Ichthyosauria）物种出现了。到了大约2.3亿年前（详见第三章第2节），就在最早的恐龙已经在陆地撒欢时，鱼龙也已经具备了优美的流线型身体——它们的身体细长，吻部也逐渐加长，四肢特化成了桨状的鳍肢。原本类似于蜥蜴那样的尾巴，更是逐渐发育，在原本尾巴后段的上部，最开始是出现了一个肉质的突起。这个突起后来又逐渐变大，最终和带有骨骼的原本的尾巴一起构成了一个新月形的尾鳍[(11)]。



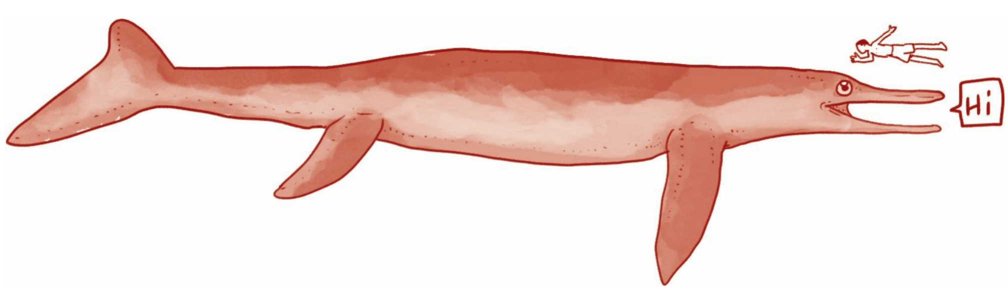
在这之后它们的体形又逐渐变粗，经典的纺锤状身体出现了。与日后的海豚类似，鱼龙的背部也发育出了坚硬的背鳍，用来搭配上它们新月形的尾鳍，再配上由前后肢演化而来的两对桨状的鳍，使得它们在水中快速推进的同时，还能保持平衡、精确定向、迅速制动。

这个时候，它们已经拥有了足够的制霸海洋的资本，体形完全“回到了”脊椎动物最为适应海洋的经典造型——鱼形。皮肤表面赤裸，头部向前延伸形成一个细长的吻，口腔里则长满了细长内弯的牙齿，颈椎非常短，这都可以最大限度减少水的阻力。类似于早期那些在岸边生活的鱼龙前辈，此时的鱼龙依然有一对大到可以用“萌”来形容的眼睛，不过它们的眼球非常平，眼球前还被一个大而强壮的骨化巩膜环所包

围。[(12)]

鱼龙除了眼睛之外，可能还有其他的探测方式——通过扫描技术，研究人员就发现了鱼龙的头骨顶部和上颚之间，有一道类似“内鼻”的结构，很像是一种负责嗅觉的器官。在头骨当中，还找到了一些很深的凹槽，科学家认为那些凹槽是神经和血管的通道，神经网络可以传输来自鱼龙前方的信息，凹槽里甚至还可能隐藏着一些复杂的感觉系统，比如说电场感受器等——虽然这只是猜测，但也不无道理。比如鲨鱼就有类似的感觉器官，它们的传感神经元可以侦测来自猎物的电场。科学家就推测，很可能有部分种类的鱼龙也有类似的侦测系统。因为，尽管它们有很大的眼睛，但依然存在盲区。它们的正前方有一块不小的地方，眼睛是看不到的，鱼龙也许就需要依靠某种感觉器来探测它们眼睛看不到的地方。

就像后来的鲸类一般，很快这些鱼龙又演化出了一些其他面貌，个头也有大有小，这种形态和体形的差异也反映出当时的鱼龙已经抢占了多种不同类型的海洋生态位。要知道二叠纪时，这些位置原本都属于那些从未离开过海洋的鱼类前辈。目前最为可靠的“最大体形鱼龙纪录”的保持者是一种萨斯特鱼龙（Shastasaurus），保守估计的体长有21米，体重可能有50吨，身体形态类似海豚——流线型的头部，狭长的口鼻，嘴里布满锋利的小牙[(13)]。



西卡尼萨斯特鱼龙

以鱼龙为代表的这类生活在海洋中的蜥形纲物种，通常也被称为“海栖爬行动物”（下文简称“海爬”）。从三叠纪开始的整个中生代，

这些动物都是海洋舞台的绝对主角。虽然接下来的时代还出现了更强大的竞争者，但三叠纪的海洋无疑是“鱼龙的王朝”。

可惜的是，在三叠纪末的大灭绝，让萨斯特鱼龙科的这些大家伙退出了历史舞台。到了侏罗纪，虽然鱼龙依然在海中畅游，但它们面对的竞争更加激烈了——越来越多的“龙族”同类也重返了海洋，并且出现了许多强大的掠食者。

浅海新王

就在鱼龙帝国迎来全盛的三叠纪晚期，另一种大名鼎鼎的“海爬”悄悄登场了。鱼龙们或许不会想到，这些还不怎么起眼的小家伙，在日后将会对它们的“王位”发起有力的冲击——这就是蛇颈龙（Plesiosauria）[(14)]。

分类上，蛇颈龙目属于鳍龙超目（Sauropterygia），这个家族在中生代的后期盛产“海中巨龙”。在更上一级的分类中，它们则属于主龙型下纲（Archosauromorpha），与三叠纪陆地称霸的“主龙”们是表兄弟的关系。再细分一下，它们又与龟鳖形类（Testudinata）同属泛龟类（Pantestudines），所以你硬要说蛇颈龙属于某种意义上的“龟”，我也无法反驳。之所以说那么多，则是想强调，蛇颈龙的祖先和鱼龙的祖先关系并不近，起码在鱼龙超目出现之前，就已经分家了。不过，蛇颈龙下海的过程，应该与早期鱼龙类似，有一个漫长的过渡期。

在这之后，蛇颈龙目的物种又分成了两派：一部分逐渐变成了脖子细长、头很小的蛇颈龙亚目（Plesiosauroidea），这些便是狭义上的蛇颈龙；另一部分的脖子和头则相反，脖子较为粗短、大头大嘴，这便是上龙亚目（Pliosauroidea）。但无论是哪一派，它们的共同特点都是特化的、适合划水的、大而厚实的鳍状四肢。相比于后期的鱼龙来说，蛇颈龙类的四肢还是强健有力的，所以科学家就推测：蛇颈龙或许依然能够爬上岸去休息或者是产卵繁殖后代[(15)]。

关于蛇颈龙的四肢，还带出了一个有趣的疑问——它们在水中到底是如何运动的？一些观点认为，应该是类似海龟和企鹅那样，依靠前肢的上下运动在水中“飞行”；但也有观点认为，它们的运动方式可能非常独特，或许会“交错”拍打前后肢，从而保证在运动时总会有至少来自一对鳍状肢的推力。

长脖子

至于蛇颈龙亚目那夸张的细长脖子，又有什么作用呢？目前古生物学家还不能够下结论。一种观点认为蛇颈龙长长的脖子增加了头与身体之间的距离，这样它们就可以在整个身体还没有暴露前靠近猎物，有利于捕食；但另外一种观点又进行了反驳，认为长脖子用于隐蔽的作用不大。因为蛇颈龙在海里呼吸的时候会产生压力波，猎物只要感觉到压力波的存在，即使还没有看见蛇颈龙，也会迅速逃走。相比之下，蛇颈龙的咽喉较大，估计它们会在靠近猎物的时候，突然扩张咽喉，以消除因为呼吸而产生的压力波，这样它们就可以在动静很小的情况下，张大嘴吞下猎物。与此同时，它们通过其粗大的喉管强有力的扩张，产生强大的吸力，将猎物吸入口中，囫囵吞下。

至于一些插图中常见的蛇颈龙探出头捕食翼龙甚至鸟类的场景，只能说是科学家的合理想象，即便如此，也不太可能是长脖子演化的“目的”。不过，如果结合它们的日常菜单及生活水域，似乎又能找到些关于“长脖子带来的好处”的线索。过去，人们认为蛇颈龙的食谱中主要是鱼类和壳比较少的头足类（类似鱿鱼）。后来，人们在蛇颈龙化石的腹部发现了菊石和双壳纲软体动物的化石（贝类）。这就说明，这些带硬壳的生物也是蛇颈龙的美餐，而且它们是连壳一起吃的！古生物学家还在蛇颈龙的胃里发现了很多胃石——一些滚圆的鹅卵石。这个线索就更说明问题了，因为蛇颈龙的牙齿比较细，不太可能像鲨鱼那样咬断猎物，进食时基本上是吸进口腔、囫囵吞下，再依靠胃里的这些胃石来研

碎猎物的硬壳。

目前发现的蛇颈龙都生活在近岸的浅水环境，于是乎，我们便可以想象这样一种场景——它们的身体悠然地浮在水中，长长的脖子就像吸尘器一般探索海底，把贝类、螺类、鱼类甚至小石子一股脑儿都吸入胃中，慢慢消化。

短脖子

在三叠纪的末期，上龙和蛇颈龙就已经分家了。不过，一开始的时候它们的形态还比较类似，可以理解为是一种脖子不长不短、头不大不小的形态。比如，生活在侏罗纪早期的一种原始上龙巨板龙（Macroplata），得名于它们大大的肩胛骨，这些肩胛骨发展成大块的腹底骨板，主要用来支撑前鳍。它也有条长脖子，不过比例并不夸张，脖子只有头骨长度的两倍而已。将其分类为早期上龙的关键，则在于它们已经显得窄长的口鼻部。

到了侏罗纪晚期，上龙那短脖子、大脑袋的特征已经非常明显了。比如英国出土的泥泳龙（Peloneustes）[(16)]。从泥泳龙开始，上龙类的特征——大嘴、短脖子逐渐明显起来。相比于前一代的上龙先祖，泥泳龙的椎骨减少到22块。它们的颈骨下面还有一条类似于龙骨一样的组织，可能起到支撑作用。不过相应地，它们的脖子便不能像蛇颈龙那样灵活转动。与蛇颈龙相反的是，泥泳龙的后鳍比前鳍要大，这可能赋予它们更为强大的游泳能力。

2004年，古生物学家发现了一种巨型上龙类生物的化石，生活在1.5亿年前的晚侏罗世。经过大量的发掘和整理后，他们逐渐拼凑起了两件不怎么完整的标本。结果发现，其中一件的头骨长度竟然在2～2.5米！如果按照已知的上龙类头身比进行换算的话，它的长度应该在10～13米，这直接让它成为已知的最大体形上龙。在正式命名前，研究者给它取了个很酷的绰号：“掠食者X（Predator X）”。也正因为这个颇具神

秘色彩的称呼，掠食者X开始在媒体走红。

在大众喜闻乐见的“斗兽”类话题中，掠食者X也是常客。2009年，有研究者参考了美洲短吻鳄的咬合力对掠食者X进行了估测，结果得到了一个惊人的数值——几乎是霸王龙的3倍。这在当时引起了不小的轰动，加上随后一系列与之相关的纪录片的推出，更是让它成了不折不扣的古生物明星，甚至一度被称为“海洋中出现过的最可怕动物”。

后来，这种生物有了正式的学名：冯氏上龙（Pliosaurus funkei）。其实，由于化石的不完整，我们很难确切地知晓冯氏上龙真实的体格。但这并不妨碍它成为晚侏罗世浅海的顶级掠食者。



蛇颈龙和冯氏上龙

上龙的辉煌一直延续到了白垩纪。1.2亿年前的白垩纪早期，统御浅海的是一种名为克柔龙（Kronosaurus）的上龙科生物。它们的名字来源于希腊神话里的宇宙统治者克洛诺斯。克柔龙体长在10米左右，嘴巴和脑袋几乎一样长，牙齿很大，超过7厘米，呈圆锥状。从体形上看，它和其他的上龙并没有太大的区别，类似于冯氏上龙，它的后鳍也远远长于前肢。根据分析，这种造型虽然不利于它们加速追击猎物，却能提高转向的灵活性。这也和它们的捕食目标有很大的关系——主要以其他种类的蛇颈龙、海龟、大型软体动物等游速较慢的生物为食。

或许也正因为如此，在白垩纪中晚期崛起的沧龙类进入海洋后，以克柔龙为代表的大型上龙类便渐渐退出了历史舞台。

插曲：下海的鳄鱼

你应该还记得，从侏罗纪开始，大量适应水生环境的鳄鱼就已经出现。照理说，这个自带水生天赋加成的物种，应该也能在海洋中大放异彩。可为什么鳄鱼里并没有出现鱼龙、上龙、沧龙这样的“大海爬”呢？其实，鳄鱼也并非总安于在淡水边伏击猎物。征服海洋的这个梦，它们做过也尝试过。而且，还尝试了不止一次。

现如今，就依然有一种生活在咸水环境的鳄鱼——湾鳄（Crocodylus porosus），这也是现存体形最大的爬行动物之一。湾鳄一般可以长到4米长，其中的大块头甚至可以长到7米以上。它们主要分布在东南亚、南亚，以及澳大利亚部分地区的咸水和淡水交界处，比如河口、红树林、沼泽等区域。

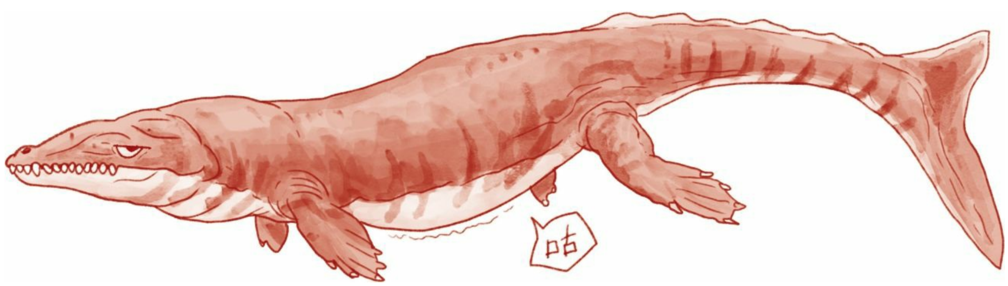
作为现今仅存的咸水鳄鱼，湾鳄演化出了一套适应高盐度环境的生理结构。比如，它们和大多数淡水鳄鱼不同，颈部、背部的鳞片非常少，折叠式的皮肤可以防止海水灌入耳中。它们大部分时间都生活在咸水区，每到繁殖季节，才返回淡水区域进行交配和产卵。要说在食物链中的位置，起码在它们生活的区域，并没有什么与之势均力敌的对手——澳大利亚摄影师就曾经拍到一条80岁高龄的湾鳄捕食鲨鱼的场景。

不过，从某种角度来说，湾鳄依然不是纯粹的海洋鳄鱼，它的陆地动物特征依然非常明显，比如四肢和尾部并没有因其生活在咸水中而退化成鳍肢和鳍尾。不过，如果回望过去，鳄鱼家族中倒的确出现过一些真正意义上的“海鳄”。

侏罗纪早期，随着恐龙的全面崛起，被挤占了大量生态位的其他“龙族”纷纷下海谋生，其中也包括了前任“陆地霸主”拟鳄的一些后

裔。在这场声势浩大的下海运动中，海鳄亚目（Thalattosuchia）也是非常繁盛的一条支线。从侏罗纪早期一直到白垩纪早期，海鳄们的化石遍布世界各地的海洋。

这其中，甚至出现了非常具有“海洋特征”的噬蜥鳄属（Dakosaurus），也叫达克龙。它们生活在侏罗纪晚期，身体为了适应海洋生活演化成了流线型，四肢和尾巴也变成了适合游泳的鳍状肢和鳍尾，鳞片也被较为平滑的皮肤所取代，体长有4.5米，很像是早期的鱼龙。它们很有可能在海中完成交配，但由于并未发现卵巢的化石，所以，它们是像鱼龙那样在海中卵胎生，还是像海龟那样在岸上出生，仍然是个未知数。



噬蜥鳄

海洋鳄鱼的这种变化，可以算得上“牺牲防御换速度”，虽然防御能力下降了，但是这种特殊的体型也获得了极佳的速度能力。在当时，它们的生态位并不低，食谱中包含了中小型的鱼类、菊石、龟类、蛇颈龙的幼崽，甚至还会利用身体灵巧的优势来偷袭体形比它们大得多的鱼类。

按照这条路线发展，似乎要不了多久，海鳄也会沿着鱼龙或蛇颈龙当年走过的足迹，成为新一代的“海王”。为什么它们最终却没能如愿呢？其实，从它们下海的那一天开始，日子就没怎么安稳过。

在海栖爬行动物群雄争霸的整个中生代，它们其实算不上是一类特别成功的掠食者——除了防御力不高，体形也始终是个大问题。目前发

现的最大海鳄，也不过5～6米，这一数据甚至还不及如今的湾鳄。而中生代的海洋里，似乎最不缺的就是更大块头的海洋掠食者了。

另外，海鳄在演化当中可能受制于海水温度的变化，使得最终没能够延续种群。整个中生代，鳄鱼先后有四次进军海洋的尝试，但很可惜，每每在适应了海洋生活后，又立刻遭遇了逐渐变冷的气候，导致迅速灭绝。其实，现代鳄鱼的生活范围也同样受制于环境温度。此外，没有解决好卵生转卵胎生的问题，可能也限制了它们进一步向深水区发展。

最后的王者

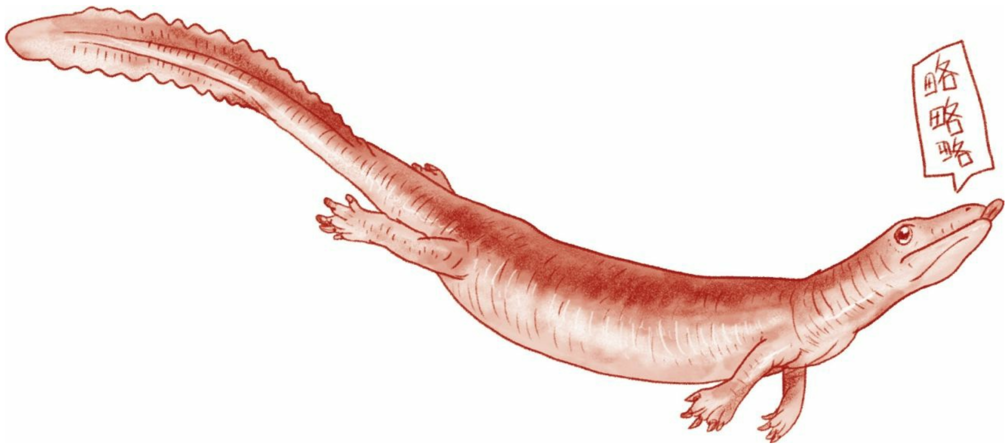
到了白垩纪晚期，又有一位“海中王者”崛起了——沧龙（Mosasauridae）。与海鳄相比，沧龙科物种下海的时机似乎“选得”很不错：强盛的鱼龙王朝在这个时候已经忽然崩塌了[(17)]，海鳄也早已作古，上龙等鳍龙类也慢慢衰落[(18)]。别忘了，上一章说过的一个重要的背景——白垩纪的浅海面积是4亿年来最为广阔的（详见第三章第5节）。

这个难得的中生代海洋“空窗期”，对心向大海的陆地生物而言，无疑是个绝好的机会。一种生活在古地中海边的崖蜥（Aigialosauridae）开始行动了，它们是如今蜥蜴的近亲。最初，它们开始尝试在近岸海底讨生活，不时地找些小型海洋动物为食。渐渐地，有这样一个分支，它们的食物已全部来自海中。

与部分有鳞类的亲戚类似，一个重要的基因突变出现在了这个物种的身上，它们排卵的时机被延后了。这就意味着，它们的卵可以在体内进行孵化。拥有了卵胎生这一法宝，在海中完成生育的全过程很快就不再是问题。它们终于彻底告别陆地，开始了完全的海中生活。

它们的身体结构开始迅速地演化起来，四肢也和其他“海爬”前辈一样变成了鳍状，用以保持平衡和转向，尾部则逐渐变得扁平，身体发展

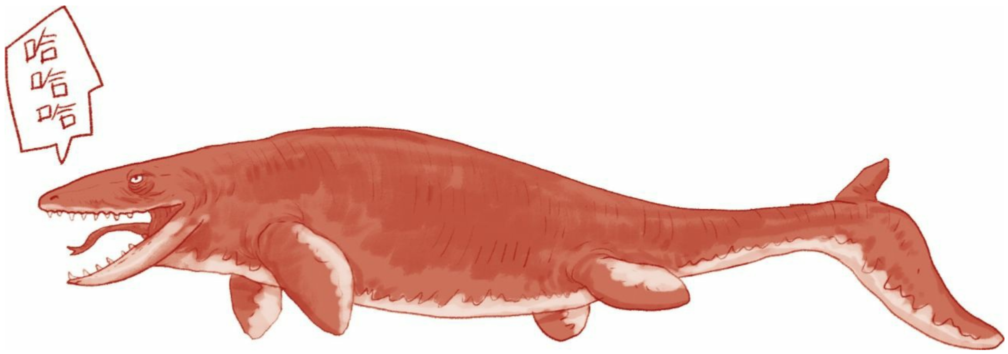
成了鳗鱼状，体表也变得光滑[(19)]。你可以认为，它们“鱼形化”比较成功。



达拉斯龙

再之后，一些更进步的后代则演化出了分成两片的尾鳍，而尾鳍的出现也让它们的游泳方式从鳗鱼式逐渐地变成了鳟鱼式，到最后更是直接采用了类似鱼龙的泳姿。总之，一切的一切，都是为了进一步提高在水中的运动速率。渐渐增大的体形使得它们的体温更加恒定，针对不同的食物，它们也演化出了不同的牙齿类型。可能是下海的时机太过于完美，又或者是自身的条件实在太过优越，令古生物学家都大为不解的是，在最初的崖蜥下海后，仅仅300万年的时间，它们之中就发展出了体长超过10米的、完美适应海洋生活的顶级掠食者。而这一切，当年鱼龙花了2000万年才完成。

如果你看过电影《侏罗纪世界》的话，应该会对那头吃大白鲨和恐龙的怪兽印象深刻。在电影里，它的个头被夸张到了30～40米，甚至超过蓝鲸。不过，现实中的沧龙并没有电影中那么夸张。电影的原型应该是霍夫曼沧龙（Mosasaurus hoffmanni），最大的体长达到17.6米，约16吨重。尽管如此，这样的“巨龙”也依然足以成为白垩纪晚期所有浅海生物的梦魇！



霍夫曼沧龙

至于后来的事情嘛，你们也都知道了，好景不长。即使是沧龙那么成功的物种，也依然和恐龙一起，消失于第五次大灭绝。

龙族的遗珠

在沧龙之后，蜥形纲的后裔也并非彻底退出了海洋争霸的舞台。除了前面提到的湾鳄，如今海洋中也依然有两种著名的爬行动物畅快地生活着——海龟和海蛇。考虑到鸟类也算是如今依然繁盛的“龙族”的直系后裔，那企鹅应该也算。

海龟

龟是一种古老而十分有趣的动物，它们的龟壳由连在一起的骨头组成，在脊椎动物里，这种结构是绝无仅有的。这一结构特征最早出现在2.2亿年前的三叠纪。在水生龟类这条分支中，最早出现的是淡水龟，在侏罗纪时，已经出现了可以适应咸水环境的类型，它们具有泪腺，可以分泌过多的盐分。

在演化的过程当中，海龟还开始形成了一些特有的功能，比如说肌肉可以承受高浓度的乳酸，长距离的游泳之后也不会感到疲劳。它们的膀胱容量很大，倒不是用来憋尿，毕竟也没必要，而是帮助它们保持浮力。

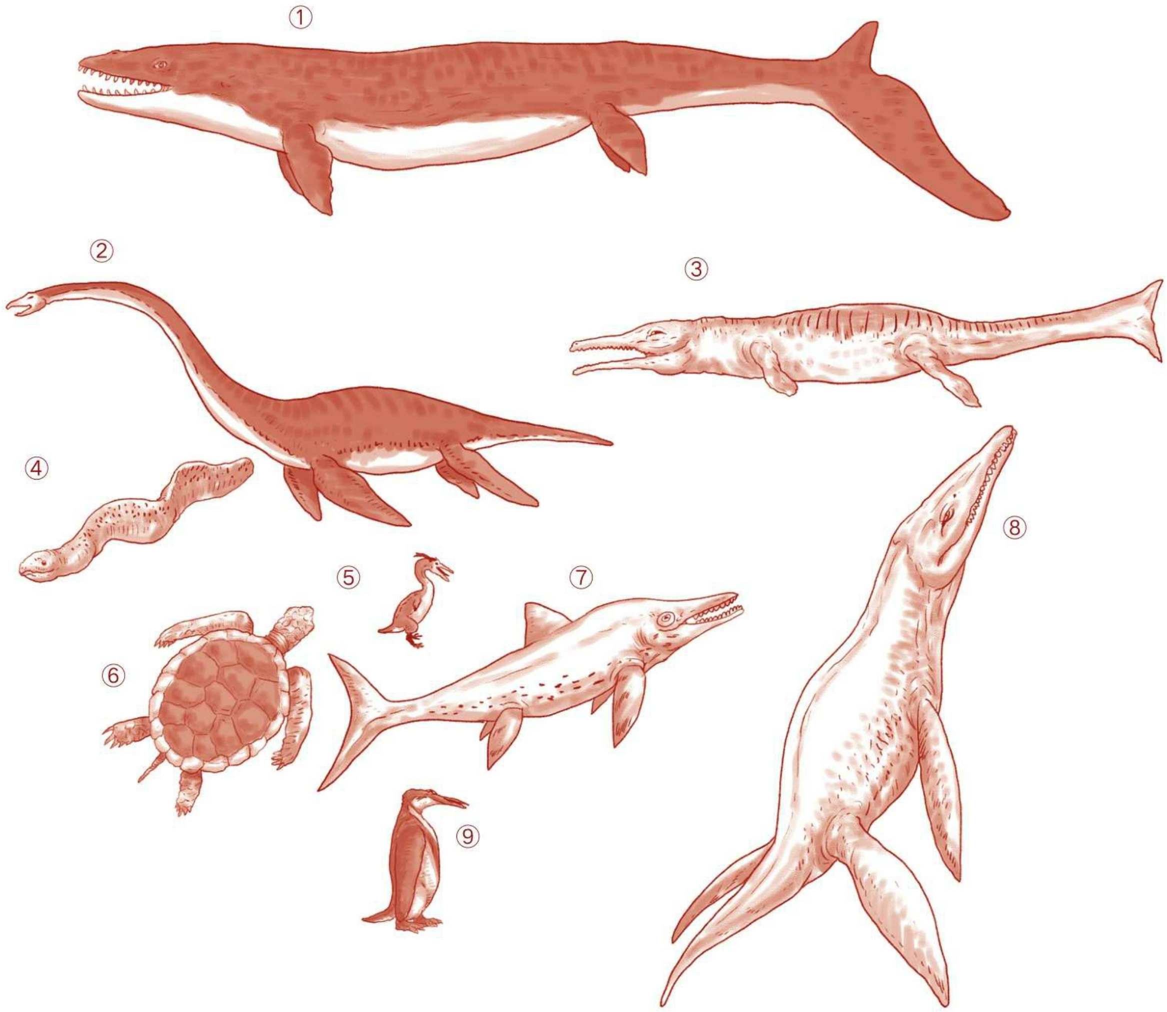
尽管海龟失去了一般水龟可以把四肢及头部缩进龟壳的能力，但是它们的头盖骨却在演化过程中得到了强化，并且能够包住整个头部。与鱼龙、蛇颈龙、沧龙这些下海的前辈、同辈或后辈一样，它们的四肢也都演化成了船桨一般的鳍状肢。相比之下，海龟前肢长度明显更长，这也使得它们可以在水中如鸟儿一般自由“翱翔”。

海蛇

海蛇与陆生蛇本是一家，最早生活在陆地上，后来由于环境变迁，机缘巧合才下水谋生。在长期的演化过程中，海蛇也逐步适应了海洋生活，身体结构也和陆生蛇有了很大的差异。不过，由于它们的蛇类祖先几乎已经把四肢都演化没了，所以它们几乎不可能再发展出经典的“鳍状肢”。不过，这并不妨碍它们适应水中生活。

海蛇的身体相较于陆生蛇，显得非常扁，在游泳的时候腹部可以收缩，使身体成为一种三角棱柱形，以减少前进的阻力。游泳时左右摆动，拨水前进，游泳速度也很快。还有一个重要的细节出现在它们的鼻孔，鼻孔位于嘴巴的前端，朝上仰开，这样一来，它们只需稍稍将鼻子露出水面，就能换气。它们的鼻孔内，还长有能够随时开启和关闭的瓣膜，可以防止海水从鼻腔进入体内，吸足空气后能够潜泳很久。在它们的舌头下面，也有盐腺，可以把体内过多的盐分排出。它们有鳞片的皮肤和陆生蛇相比也要厚很多，就是为了防止海水侵入。至于繁殖方式，既有卵胎生也有卵生。卵生的海蛇类似于海龟，会成群结队前往固定的海岛产卵。

顺便说一句，世界上所有的海蛇都是毒蛇，而且毒性很强，整个海蛇亚科都位于眼镜蛇科之下。浮潜的时候遇到它们，千万别去招惹！



①沧龙 ②蛇颈龙 ③海鳄 ④海蛇 ⑤黄昏鸟 ⑥海龟 ⑦鱼龙 ⑧上龙 ⑨企鹅的“全家福”

黄昏鸟与企鹅

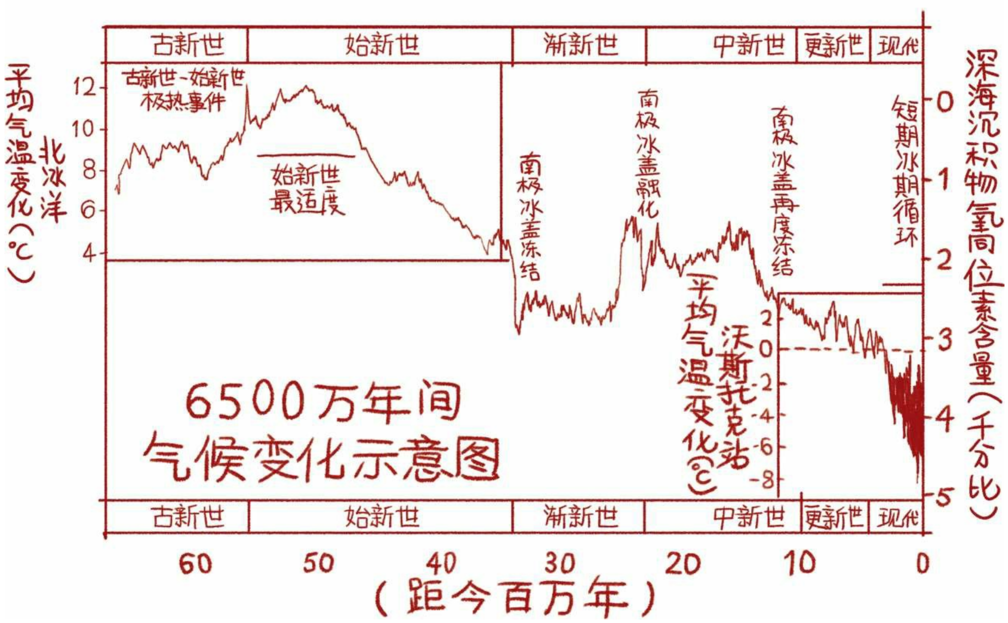
在现生的鸟类中，企鹅应该是最接近“重返海洋”的一种。成年后的企鹅，除了繁殖期，大部分的时候生活在水里。虽然其他的鸟类也有会潜水的，但要论潜水时间和潜水深度，则没有一个是企鹅的对手。根据现有的记录，企鹅的潜水时间最长可达18分钟，最大下潜深度达到265米！它们的骨骼坚硬，脚短且平，配合类似于桨的短翼，让它们可以在水底“飞行”。经过长期严寒的锤炼，它们的羽毛演化成了重叠、密接的鳞片状，防水又保暖。

在晚白垩世，还生活过另一种高度适应水生环境的鸟类——黄昏鸟（Hesperornis），这一目的物种应该是鸟类中最先选择下海谋生的。它们的翅膀几乎完全退化了，成为两个短小的鳍（比企鹅的还小）。个头并不小，最大的可能超过1.5米。与企鹅相比，它们的脚非常大，应该是它们在水中的主要动力来源。不过，从骨骼结构上分析，它们可能无法在陆地上用腿支撑住自己的身体，只能依靠腹部扭动着前进。因此，大部分时间它们应该都漂在海上，时不时下潜捕猎。与企鹅类似，在繁殖季节，可能会在安全的岸边群居。

鲸的奋斗史：升级装备称霸深海

上节说到，古生代那次惨烈的生物大灭绝之后，一拨又一拨的蜥形纲“龙族”在中生代开启了重返海洋的征程。先后建立起了“鱼龙帝国”“蛇颈龙联邦”以及“沧龙王朝”，前后跨越了将近1.8亿年的时间。几乎整个中生代，海洋食物链的头把交椅，都被这些“海爬”们牢牢占据。这一切，都被6600万年前的那次大灭绝所改变。

浩劫之后，新生代的序幕也就此拉开了。哺乳动物，终于可以肆无忌惮地在地面溜达了。此后的1000万年，它们迅速地发展出了众多有趣的物种，占据了那些本属于恐龙的生态位。新生代虽然焕然一新，但也并非完全一派欣欣向荣、风和日丽的景象。相比之下，白垩纪的气候可能更加宜人。新生代时期，全球性的大规模气候变迁时常发生，有时还会出现些范围特别大的气候变迁事件。比如5500万年前，古新世和始新世更替之际，就发生了一次著名的“极热事件”。



地球的气候变迁真的很有意思，类似之前说过的“雪球地球”，系统性的风险一直存在，只是不知道什么时候以什么样的形式降临。根据现在的研究，当时的大气当中突然出现了大量来历不明的含碳温室气体，这就导致地球的温度在短时间内迅速上升。根据估计，大量碳的排放持续了2万～5万年，随后的整个温暖期持续了20万年。这一时期里，全球平均气温上升了5℃～8℃。

这种全球性的大气事件自然也在生物圈掀起了不小的波澜：在植物界，真正意义上的草开始繁盛；海洋中，超过50%的有孔虫灭绝了；对于陆地动物来说，最显著的变化发生在哺乳动物身上——原本占总物种数近80%的古老类型的哺乳动物物种数骤降到45%，取而代之的则是偶蹄目、奇蹄目、灵长目等物种的兴起。可以说，现代哺乳动物的基本面貌就是在极热事件之后的始新世奠定的基础。

披着狼皮的羊

大约5000万年前，出现了一种早期的陆生偶蹄类动物——巴基鲸（Pakicetus）[20]。一开始，发现巴基鲸化石的古生物学家也很困惑，他

们想不明白这种“披着狼皮的羊”到底是什么。通过不断发掘的化石，古生物学家们发现，这种生物的踝骨结构和偶蹄类动物相同，但耳骨鼓泡很接近现代的鲸类。两者结合之后，他们得出结论：这是一种早期的生活在陆地上的鲸类。



巴基鲸

虽然在亲缘关系上，巴基鲸可能和河马的祖先更接近一些，但它们当时的样子，的确更像是如今的狼或狗：比较长的嘴巴向前凸，全身长满毛发，纤细的四肢位于身体正下方，身后一条细长的尾巴，用来在奔跑时维持平衡。不过，它们的个头还不如现在的狼，体长只有1米左右。总之，单从外形上，你恐怕找不到半点鲸类的影子。硬要扯点关系的话，它们可能偶尔会下水——巴基鲸生活的区域靠近湖泊、河流或海边，可能以小动物或其尸体为食。也就是说，在抓鱼的时候，它们或许会以“狗刨式”的泳姿短时间进入水中。

这样的小型肉食动物，在当时虽然远谈不上称霸，但小日子也算过得滋润。可后来，地球的气候又开始任性了。分裂的大陆形成了新的洋流，把温暖的水汽送往极地，渐渐地，全球平均气温开始逐渐升高，甚至逐渐接近“极热事件”时的峰值。陆地上的一些地方，气候变得炎热而干燥，植被消退，猎物也因此变少。另一方面，升高的温度又使得近岸的浅海变得非常富饶。海滩边，也因此常出现被冲上岸的死鱼。最初，一部分巴基鲸可能常游走在海滩上，搜寻着这样的免费午餐。再后来，它们干脆直接进入浅海搜寻食物。就这样，一段伟大的哺乳动物下海之

旅开启了！

小知识点补充

鲨鱼的复辟

沧龙灭绝之后，古新世的海洋一度就成了巨型鲨鱼的天下。在第五次生物大灭绝中，一种生活于白垩纪的鼠鲨科（Lamnidae）小型鲨鱼得以幸存，并且深深影响了新生代海洋争霸的格局，它们便是日后锯齿鲨和大白鲨的共同祖先。新生代的头1000万年（古新世），它们中的大家伙体长已经有9米。鼠鲨的分布非常广泛，世界各地都可以找到这类鲨鱼的牙齿。可以说，在这不长不短的2000多万年间，海洋食物链的头把交椅，重新回到了鱼类那边。只不过，好景不长，“海爬”大佬们前脚刚走，后脚又来了一群新的不速之客——海栖哺乳动物。

游走的鲸

重返海洋，对任何一种已经高度适应了陆地生活的动物而言，都不是一件容易的事。虽然浅海里早已没有了沧龙，但已经演化了3亿年之久，好不容易才重新坐回王座的鲨鱼也同样不是好惹的。

那些开始在浅海捕鱼的巴基鲸，不得不面对来自鲨鱼的威胁。由于体形上还不足以跟鲨鱼抗衡，逃跑便成了唯一的选择。或许它们重复着这样的日常：到浅海里捕鱼，随时提防着鲨鱼，鲨鱼来了就拼命地游泳逃跑。当然，不排除许多巴基鲸进了鲨鱼的肚子，但运气好的和那些更善于游泳的，就回到了岸上休息与繁衍。

这样的日子重复了差不多100万年，巴基鲸的一些后代，渐渐出现

了变化——它们的体长已经发展到3米，原本长在身体下方的笔直的腿，变得又短又粗，转移到了身体的两侧，还长出了类似海狮的脚蹼。尾巴逐渐扁平，躯干也开始呈现流线型，胸腔更是比以前宽厚不少，似乎更能憋气了——这就是走鲸（Ambulocetus natans）。

有了这样的体形，它们已不再需要“狗刨”，而是类似于现生的鲸类，主要通过上下摆动尾巴来推进。还没有完全退化的四肢，使得它们依然具备一定的陆地行动力，走鲸的名字也由此而来。走鲸的化石同样出土于巴基斯坦，它们出现的时间是4900万年前。

变大的体形让走鲸无法再像以前那样，仅靠近岸海域的小鱼虾来维持身体所需了，尤其是遇上水中食物相对匮乏的时期。可是如果此时就进入更深的海域去捕捉大鱼，似乎也并不划算，而且还需要面对体形更大、水中技巧更强的鲨鱼。好在，这时候的陆地再次变得生机勃勃。在河边，常会出现一些中小体型的动物。或许，在不够吃的情况下，走鲸就会进入淡水区加餐——类似鳄鱼那样，伏击取水或渡河的陆生动物。



走鲸

在这之后地球再次发生了变化，温暖的气候使得浅海区的日照愈发充足，从而滋养了大量的微生物，这又养活了数不尽的鱼虾。随着近岸海域的食物再次变得充沛，它们也逐渐放弃了模仿鳄鱼的营生，专注于提高捕鱼的技巧。毕竟，要想真正把浅海区变成自己的“自助餐厅”，还需要问问鲨鱼们同不同意。

升级装备

一晃又是300万年。它们的身体又发生了一些改变，脖子更加短粗有力，尾部更加强健，身体更趋流线型，看起来越来越有“鲸”样了——这就是罗德侯鲸（Rodhocetus）。



罗德侯鲸

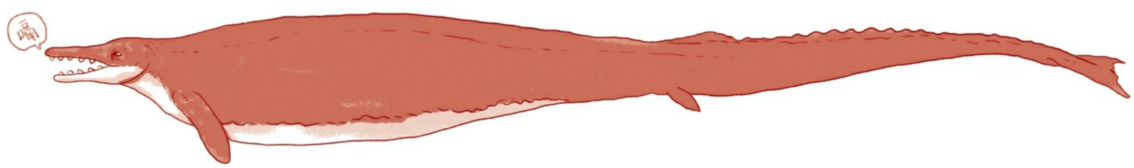
除了这些外部装备的升级，它们的身体内部也获得了许多强化：肾脏增加了过滤盐分的功能，使得它们可以饮用适量的海水，而不像以前那样必须依赖食物获得水分；内耳中半规管的缩小更是关键——这是用来维持姿势和平衡的内耳感受装置。半规管是三根相互垂直的小管，管内充斥液体。运动时，液体跟着流动，神经细胞则会将液体流动的情况传给大脑。大脑在得到信号后，就会对身体给出保持平衡的指令。类似手机里的三轴陀螺仪。如果运动过于剧烈，小管中的液体也会剧烈晃动，从而让神经细胞将混乱的信息发送给大脑，大脑就无法及时给身体发出正确的平衡指令。这也是坐过山车或者摇头晃脑的时候感到眩晕的主要原因。

不论是远古的罗德侯鲸还是现代的鲸，它们的半规管相对于体形都很小，里面的液体几乎不会流动，不会将过多的信息传送给大脑，也就不太容易产生眩晕感。这对于运动自由度更大的水栖环境，无疑有莫大的好处。虽然从外观上依然能看出罗德侯鲸具备一定的陆地移动能力，但相比于它们更古老的祖先，它们对陆地的依赖已经非常小了。

称霸浅海

丰饶的浅海，让一些已经高度适应水生环境的鲸类逐渐走上了“巨大化”之路。第一个登上食物链顶端的物种出现了：龙王鲸（Basilosaurus）[21]。如果是第一次看到它们的化石，你应该会十分惊叹——它们实在是太过“修长”了。如果不是垂直方向弯曲的脊柱在体形上提示我们这是哺乳动物的成员，你甚至会觉得你面对的是一条“龙”，或者大鳗鱼！

龙王鲸的身体结构当中，还有一处与现代鲸类差异明显的有趣细节：一对0.6米长的后肢[22]。考虑到它们近20米的体长，这对“小短腿”显得有些“反差萌”。可以肯定，这样的后肢对它们运动能力的作用已经微乎其微。或许，这对后肢存在的意义是“引导交配”——功能上可能类似依然在肛门两侧留有一对残足的蟒蛇，毕竟龙王鲸也同样具有蛇一般的修长体形。



龙王鲸

这样的体形，也使得它们与陆地完全无缘了。而且，这可能也限制了龙王鲸，使之只能在浅海区活动。古生物学家认为，它们的身体结构，应该无法承受深海的压力。除了龙王鲸，此时的鲸家族成员已经十分丰富了，个头上也有大有小。不排除这种可能——龙王鲸的存在迫使一些小体形的鲸鱼远离浅海的“舒适区”，去适应更为广阔的深海。

正当龙王鲸在浅海区所向无敌的时候，地球的面貌再一次发生了改变。还记得上一章提过的南极陆块吗？大约在4500万年前，南极大陆和澳大利亚大陆分裂，温暖的赤道洋流开始偏离南极地区，在两块大陆之间形成了一个孤立的寒冷水道，这便是南极环流的雏形。南极大陆的温度开始逐渐下降，原本郁郁葱葱的景象逐渐消失。冰与雪，慢慢成为这

片大陆的主基调——与这一过程相伴的，则是始新世的后半段，全球气温的逐步下降。

到了大约3500万年前，南极大陆终于出现了冰盖，全球的平均气温更是经历了一次骤降。大量原本该参与水循环的水，被冻结在了南北极，这就导致了海平面的急速下降[23]。结果，大片大片的浅海区，变成了陆地。对于以龙王鲸为代表的浅海区鲸鱼而言，这无疑是一场严重的灾难。被迫进入深海区的它们，很快便走向了灭绝。它们也并不是现代任何鲸鱼的祖先。

适应深海

由于幸存的鲸类此时的体形都还比较小，始新世末期的这次规模不算小的灭绝事件，让鲨鱼再一次获得了“绝对海权”——鼠鲨家族中，长11米、重8吨的安格斯迪鲨（Carcharocles angustidens），在此时找不到任何对手。

前面说过，在龙王鲸称霸浅海的时候，已经有一部分鲸鱼开始探索深海了，虽然最初的原因可能是迫于无奈，这部分鲸鱼就是矛齿鲸（Dorudon）。它们的身形与龙王鲸十分相似，甚至一度被当作未成年的龙王鲸。顾名思义，它们拥有长矛般锋利的牙齿，身材已经颇具现代鲸类的流线型，相比于龙王鲸，它们要“娇小”得多，体长只有5米。当它们面对安格斯迪鲨时，恐怕凶多吉少。这时候，哺乳动物的社会性天赋或许就发挥其作用了——它们结伴群居，团队合作，已经能看到点“海豚”的影子了。



矛齿鲸

流线型的身体，则让它们可以下潜得更深，这无疑可以帮助它们在食物相对匮乏的深水区获得更多的机会。但它们需要面对的麻烦还不止这些，要知道，阳光能照亮的海洋深度通常只有200米，再深的地方，几乎就是漆黑一片。因此，要是在深海捕猎，视觉能发挥的作用十分有限。长期的水生生活，又让鲸类的“陆地鼻”没了用武之地。当视觉与嗅觉这两大侦测利器都失去作用时，哺乳动物的另一个看家特长听觉的重要性就愈加明显。

在深海区生活的鲸类开始不断强化基于听觉的感知系统，最后便发展出了一项绝活：声呐。它们会不断地发出频率极高的叫声，声波在碰到物体的时候就会反弹，并传回它们的耳朵。由于鲸类已经适应了这种与外界的交互感知模式，脑海中的声音信号，某种程度上已经类似于我们的视觉信号，通过声呐，它们可以判断出物体所在的位置、大小，甚至形状。

虽然矛齿鲸还没有办法如现代鲸类般高效地使用超声波，但在此后的数百万年中，这些深海区鲸类的感知系统将会逐渐打磨至炉火纯青的地步。渐渐地，它们再次分成了若干个派系。而我们如今熟悉的须鲸和齿鲸这两大鲸类的分支[24]，也是在这时出现的。

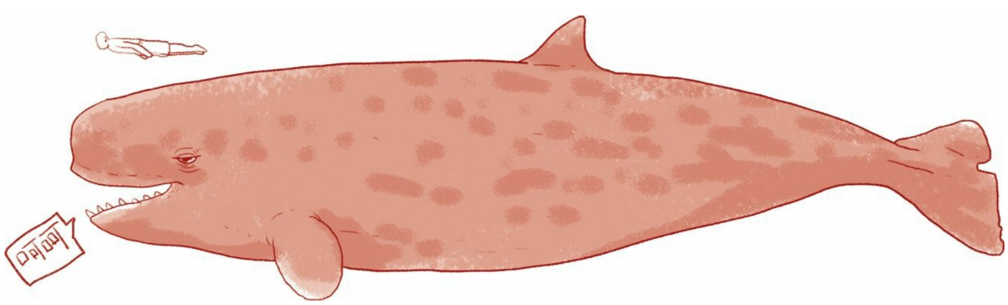
强大敌手

在鲸鱼不断升级着自身装备的同时，鲨鱼也没有闲着，大约2800万

年前，一种名为巨齿鲨（Carcharocles megalodon）[25]的迄今为止最为恐怖的鲨鱼出现了。根据估计，最大体形的巨齿鲨体长可以达到20米，平均体长也超过16米，照此推算的平均体重在60吨以上。如果按照如今大白鲨的食量进行推算，它们每日所需的食物量恐怕得有2吨——在当时的海洋中，膘肥体壮的鲸鱼，似乎是巨齿鲨理想的食物选择。很长一段的时间里，巨齿鲨都是那些刚刚涉足深海的鲸类的梦魇。而为了躲避巨齿鲨的攻击，它们也只能够成群地活动，小心地去应对。

巨齿鲨对海洋的独霸持续了500万年，到了2300万年前，一群强有力的挑战者终于出现了——利维坦鲸属（Livyatan），它们是现代抹香鲸的近亲。这其中最为强大的存在恐怕是以《白鲸记》作者梅尔维尔命名的梅氏利维坦鲸（Livyatan melvillei）。其头颅化石长达3米，牙齿最长有36厘米，体长估计在13.5～17.5米。与现代抹香鲸相比，梅氏利维坦鲸两颚都长有牙齿，而且比现代抹香鲸的牙齿大得多，它们的牙齿也是目前所发现最大的鲸齿。它们善于深潜，也演化出了强大的深海定位系统，根据推测，它们可能是以须鲸为食。

这一时期的巨型掠食性齿鲸的牙齿化石在全世界都有发现。这也充分说明，此时的齿鲸们，已经和巨齿鲨一道，成了海洋中最成功也是顶级的掠食者。



梅氏利维坦鲸

王者归来

这种“鱼兽共治海洋”的局面持续了相当长的一段时间。一直到250

多万年前的更新世初期，才有了变化。由于全球的气温再次变低，一个新的冰川期来临了，两极地区的海水再次变得刺骨无比。对于作为哺乳动物的鲸类，这并非坏事。自行调节体温的能力，让它们并不怎么害怕寒冷，巨大的体形、厚厚的脂肪又让它们的核心温度不易流失。这些能力的加持，让它们并不惧怕两极刺骨的海水。反倒是属于鱼类的巨齿鲨，它们是不折不扣的“冷血”动物，体温会随着外部温度的改变而改变，因此便无法尾随鲸类在寒冷的水域生存。

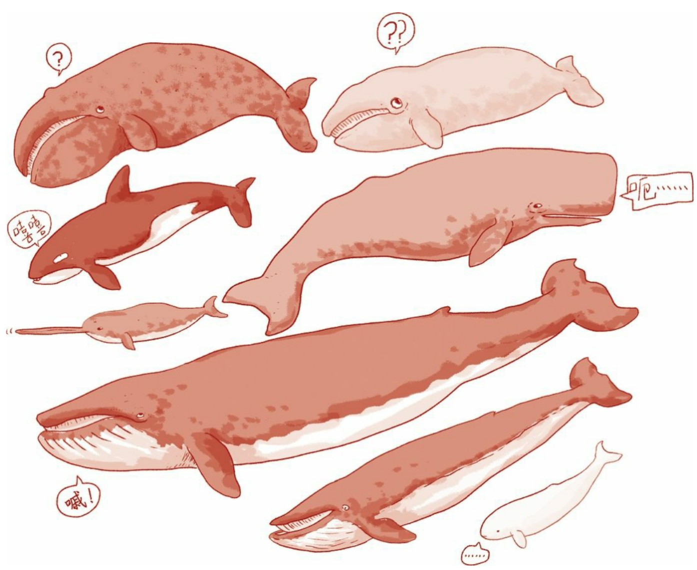
剧本或许是这样的——越来越多的大型鲸类前往更冷的水域休养生息，缺乏大型猎物来源的巨齿鲨，不得不将目标转向速度更快的中小型猎物，捕猎的成功率越来越低，一次性捕获的猎物也不够填饱肚子，只能艰难度日。

随后，在两极地区得到充分休养的鲸鱼再次升级了装备，便向着各大海域全面进军了。这一次打头阵的，是和抹香鲸类同属齿鲸的海豚类，其中一支发展出了虎鲸（Orcinus orca）。虽然虎鲸在更新世就已出现，但那个时候还不算强盛。直到全新世，随着抹香鲸类的衰落，虎鲸逐渐崛起并迅速称霸。论个头，它们并没有抹香鲸前辈巨大，体长在7米左右，但它们也有自己的制胜法宝——除了相当厉害的捕猎技巧，作为一种“大海豚”，它们同样是高度社会化的动物，可以通过声音交流，具有复杂的社会行为，甚至有些学者认为虎鲸拥有自己的文化。

虎鲸们开始和巨齿鲨们展开了对食物的正面争夺。这就使得生存本来已经有点举步维艰的巨齿鲨，在竞争者加入后处境更加困难，更找不到猎物了。最终在距今160万年前，巨齿鲨们也彻底消失在了海洋的深处。

从第一只巴基鲸开始狗刨式地下水尝试捕鱼，到如今深海当中畅游着各种各样的鲸类，历经5000万年的漫长奋斗，鲸鱼家族从这个时候开始，终于真正成了海洋的主人。它们全面超越了老对手鲨鱼，而且无论是须鲸还是齿鲸，都在各自的领域有了自己的头把交椅。

论体形，有蓝鲸——体长超过30米，体重达到200吨，这也是地球有生命以来出现过的最大的动物；论潜水能力，有抹香鲸，可以在2000米以下的深海生存两个小时，载人潜水器突破这个深度也是近几十年的事情；论在食物链中的地位，成年虎鲸除了同伴和人类之外，根本就没有天敌，就连大白鲨，在它们面前也只能退避三舍。虎鲸分布于几乎所有的海洋区域，可以说，直到人类发展出文明之前，海洋的绝对霸主就是虎鲸。



鲸类群像

小知识点补充

重返海洋的哺乳动物

除了鲸类，在如今的海洋中，其实还生活着另外一些海洋哺乳动物，分别是包括海狮、海豹、海象在内的鳍足亚目（Pinnipedia），以及包含海牛、儒艮在内的海牛目（Sirenia）。

鳍足亚目的动物在亲缘关系上接近于熊和鼬，它们下海的时间比鲸类要晚不少。它们应该起源于3000万年前靠近北极地区的某种常在

淡水湖泊中捕食的陆生食肉动物。到了2400万年前，它们的祖先已经演化出了脚蹼。可能是由于鲸类已经先于它们适应了海洋，所以尽管已经演化了3000万年，但鳍足亚目的动物依然长有毛发、需要在陆地完成繁殖，且只能在离岸不远的海域活动。与鲸类着重开发“尾巴”作为主要的游泳工具不同，鳍足亚目的尾巴非常迷你，主要依靠巨大的鳍状足在水中运动。

至于海牛和儒艮，虽然与鳍足亚目的动物非常神似，尾部及裸露的皮肤又类似于鲸，但从亲缘关系上看，其实都相去甚远——它们与大象、蹄兔同属于非洲兽总目。也就是说，最早在白垩纪，它们的祖先就与鲸偶蹄目和食肉目所在的劳亚兽总目分家了。由于没有找到明确的过渡类型化石，海牛类动物的下海具体时间尚不能确定。我们只能通过基因分析推测出它们与大象、蹄兔的最近共同祖先应该生活在5000万年前。说起下海的动机，海牛类倒是一以贯之地是为了吃草——从陆地吃到了海里。但也正是这样的食性，限制了它们的分布。2000万年前，地球的气候相对温暖，海牛的分布和多样性都非常广。但随着全球气温下降，海生植物的生长范围缩小，如今只能在为数不多的热带水域见到它们的身影。

对了，食肉目鼬科下的海獭属物种，除了繁殖外，也常年生活在海中，你也可以把这类可爱的生物算作海洋哺乳动物，它们的下海时间远没有鳍足亚目物种久远，游泳时则依靠扁平的大尾巴和带有脚蹼的后肢一同配合。由于鳍足亚目如今被分类为食肉目下的一个分支，所以我们大体可以把如今的海洋哺乳动物划分为鲸类、食肉类和海牛类这三大阵营。

重返海洋的两栖类？

两栖类为什么没有出现重返海洋的案例呢？一种假说认为，长期的淡水生活环境使得它们的生理机能已经完全无法适应高盐分的海水环境，不过如今生活于咸水和半咸水地带的海陆蛙似乎可以驳斥这种

假说；另一种可能则是，石炭纪尾声的大灭绝事件使两栖类丧失了大量的高阶生态位，从而也丧失了重返海洋的机会。毕竟，鱼龙或鲸下海的最初动力，是作为中等体形的掠食者，捕食水中的小体形动物。

重返海洋的昆虫？

昆虫家族兴旺发达，几乎可以生长于任何地方，但是非常奇怪，在海洋中却很少见到昆虫的身影。对于这个现象，有些理论认为，海浪和盐阻止了昆虫涉足海洋；其他理论则提出食肉的鱼是一种障碍；还有一种说法则认为和植物有关——海里没有树。一棵普通的树能为昆虫提供大量的栖息地：根、皮、籽、叶，以及起加强作用的组织，就给各种昆虫提供了理想且独特的栖息地。相比之下，海草仅是一些弹性的叶状组织，重返海洋的昆虫，可能就折戟在了缺乏理想根据地这一环上。

---

(1) 代表物种为三叶虫（Trilobita）。

(2) 这里指欧巴宾海蝎（Opabinia regalis）。

(3) 这里指板足鲎类（Eurypterida）。身体分头胸部和腹部，头部由六个体节组成，腹面有六对附肢，最后一对呈板状，用来游泳。首对前腿被称为螯肢，功能和蜘蛛的犬牙类似。整体看上去很像蝎子，故得此俗名。

(4) 前文提到的奇虾属叶足动物门（Dinocarida），并非节肢动物。该门物种已全部灭绝。三叶虫与广翅鲎都属节肢动物门（Arthropoda）。

(5) 邓氏鱼也是已知体形最大的盾皮鱼纲（Placodermi）物种，今已全部灭绝。

(6) 也有说它们可能会在浅海活动。

(7) 由于鲨鱼属于软骨鱼，极难保存完整化石，通常只能找到牙齿。

(8) 指如今的海狮、海豹等鳍脚类物种，顾名思义，它们的后肢变成了像鱼尾巴那样的鳍状。早期的鱼龙，既有海狮那样可以用于支撑的“大手”，同时还有一条细细扁扁的尾巴，以及两只看上去已经开始退化的小脚。

(9) 或者只在胚胎发育的后期才与母体进行气体交换和很有限的营养联系。

(10) 现生的海豚或鲸鱼，也采用尾部朝外在水中出生的方式。

(11) 这里可以复习一下上一章开篇的知识，合弓纲和蜥型纲脊柱运动方式不同，合弓纲上下

摆动，蜥型纲左右摆动（详见第三章第1节）。这也使鲸鱼和鱼龙重返海洋后，分别演化出了适应各自游泳方式的尾鳍。鲸类的尾鳍是横着长的。

(12) 有两位苏格兰学者猜测，鱼龙的大眼睛可以在阴暗的海洋里收集更多的光线，有利于发现隐藏在深水当中的小动物。灵敏的视力还可能使鱼龙可以在阴暗的深水中合作追逐猎物。

(13) 古生物学家也陆续发现了一些巨型鱼龙的化石碎片，推测的最大体形可能有28米长、180吨重。比如英国发现的“奥斯特标本”——这是一些来自一条巨型鱼龙的下颌骨碎片。

(14) 蛇颈龙出现的时间晚于鱼龙，较早的化石证据发现于2亿年前的三叠纪晚期地层；海洋龙（Thalassiodracon），从化石上看已经具有显著的水栖特征。

(15) 至于它们是否会上岸休息还不好说，但上岸产卵的这种猜测后来又似乎被推翻了。美国研究人员对一具腹中带着幼崽的雌性蛇颈龙化石进行了分析：母体长度为4.6米，腹中幼崽的体长近1.5米，而且幼崽骨骼相对完整，不太可能是被蛇颈龙吃进肚子里的。这说明，蛇颈龙似乎也是卵胎生，而且，繁育策略类似人类，一胎通常一娃，生育单个大体形的后代。目前也没有明确的蛇颈龙卵的化石被发 现。

(16) 因为出土在牛津郡的黏土层，所以有了这个滑稽的名字。

(17) 鱼龙一直生活到白垩纪晚期，距今约9300万年。目前对其灭绝的解释是环境反复和气候变化，以及菊石、箭石等海洋生物的灭绝，这是鱼龙的重要食物来源。鱼龙的灭绝并非渐变式的，而是在大约百万年时间尺度内，几个分支相继灭绝。在鱼龙灭绝后约300万年，沧龙才出现。

(18) 有人推测蛇颈龙和上龙“龟型”的身体结构限制了它们向鱼的形态继续演化，从而限制了它们进一步向深水区发展。

(19) 这里指达拉斯龙（Dallasaurus），是较为原始的沧龙科物种，生活于白垩纪晚期的北美。

(20) 最早的巴基鲸化石于1978年在巴基斯坦被发现。

(21) 学名直译为“帝王般的蜥蜴”，它曾被误认为是巨大的海洋爬行类。

(22) 现代的鲸类已经完全退化了后肢，成了尾鳍的一部分。

(23) 3570万年前至3350万年前的降幅达到55米。全球平均气温则可能在大约40万年间下降了8.2℃。

(24) 齿鲸，以虎鲸、海豚为代表，通常为凶猛的捕食者；须鲸，以蓝鲸为代表，以小鱼虾为食。

(25) 巨齿鲨和大白鲨的牙齿有些相似，相关研究指出，它们可能是大白鲨的近亲，但也有科学家认为只是趋同演化的缘故。

第五章　先有羽毛还是先有鸟？进击的飞行

提到飞向蓝天的伟大故事，多数人想到的或许是鸟类的演化，又或是莱特兄弟的壮举。但事实上，纵观整个生物史，第一批挣脱了陆地的束缚翱翔于天地之间的，却是昆虫。早在3.5亿年前的石炭纪，动物离开海洋才刚过了7000万年，最早的脊椎动物更是才刚刚开始向陆地进发，还远不能深入内陆的时候，昆虫就已经演化出了飞行的能力，而它们的后代，更是历经了数次全球性的浩劫，却依然生生不息。作为飞行这项技能最早的开拓者，昆虫的飞行能力其实十分了得。只是它们的能力往往被我们所低估。这一章，我们将会回顾地球生命征服蓝天的故事，自然先得从昆虫说起。

飞行开拓者，翅膀从何而来

昆虫最早的祖先是在水中生活的，身体分为好多可活动的环节，前端环节上生有刚毛，运动时不断地向周围触摸着，起着感觉作用。这种身躯构造简单的，类似蠕虫的小家伙，便是昆虫的始祖了[1]。

后来，这类动物的后代率先登上了陆地的舞台。为了适应陆地生活，它们的身体构造发生了巨大变化。其中的一些，由原来的较多环形体节及附肢，演变成具有头、胸、腹三大段的体态——分别对应了它们的感觉中心、运动中心和代谢中心。相比之下，其他的陆地节肢动物，要么胸腹部区分不明显，同为运动及代谢中心，比如多足类的马陆和蜈蚣；要么头胸部高度愈合，比如蜘形纲的蝎子。只有昆虫的先祖，出现了独立的专管运动系统的胸部。

这时候的昆虫祖先，从小长到大都是一个模样——幼体与成体的区

别仅仅在于身体节数的变化，以及性发育的成熟。关键的是，它们的体躯上还没有明显的可用来飞翔的翅，多条腹足也没有完全退化。后来，有些种类的腹足演化成用来跳跃的器官；有些种类还保持着原来的体态，这些生物如今被归类为内口纲（Entognatha），是与昆虫亲缘关系非常近的一个类群，比较出名的一个物种是跳虫（Poduridae）。

起码，在整个泥盆纪，还没有找到任何可以明确证明的带翅昆虫化石[(2)]。我们也有理由相信，早期的昆虫是没有翅的。当然问题也随之而来，昆虫的翅到底是从何而来的？

翅膀从何而来？

昆虫的翅似乎是“从无到有”的——在那些没有翅的昆虫近亲身上，并没有找到对应翅的结构。很遗憾，由于没有发现过渡类型化石，古生物学家甚至无法告诉你，昆虫的翅是由什么样的结构演化而来。鸟类、翼龙、蝙蝠的翅膀都明确地起源于特化的前肢。曾有人认为昆虫的翅起源于胸部的附肢，然而它们的结构相差太大，基因研究也证明二者并不同源。早在19世纪，针对昆虫翅的起源问题就已经形成了两大学说——“侧背板翅源说”和“气管鳃翅源说”。

侧背板翅源说

前者认为，最先胸部背板两侧向外扩展，再与侧板近背面扩展部分结合形成侧背板，进而侧背板再逐渐发育为翅。在如今的一些昆虫身上，我们就能看到这一过程的痕迹——在它们幼虫阶段的胸部背板上长有“翅芽”[(3)]。

按照这一学说推演的演化故事大概是这样的：早期登陆的昆虫先祖，为了躲避蝎子、蜈蚣这样的天敌，以及寻找食物，开始爬上树木向高处发展。这样一来，从高处坠落的情况便时有发生。为了不被摔死，或者借助坠落这一过程获取更好的机动性，它们胸部的突起就逐渐为生

存和繁衍创造了更多的机会——无论是保持平衡，还是减缓下降速度，甚至单纯用于防身和打架。最早的翅，或许就是这样出现的。这样的说法也有遗传学证据的佐证，有科学家对昆虫侧背板的基因进行过敲除和改变，结果的确影响了翅的形态和位置。

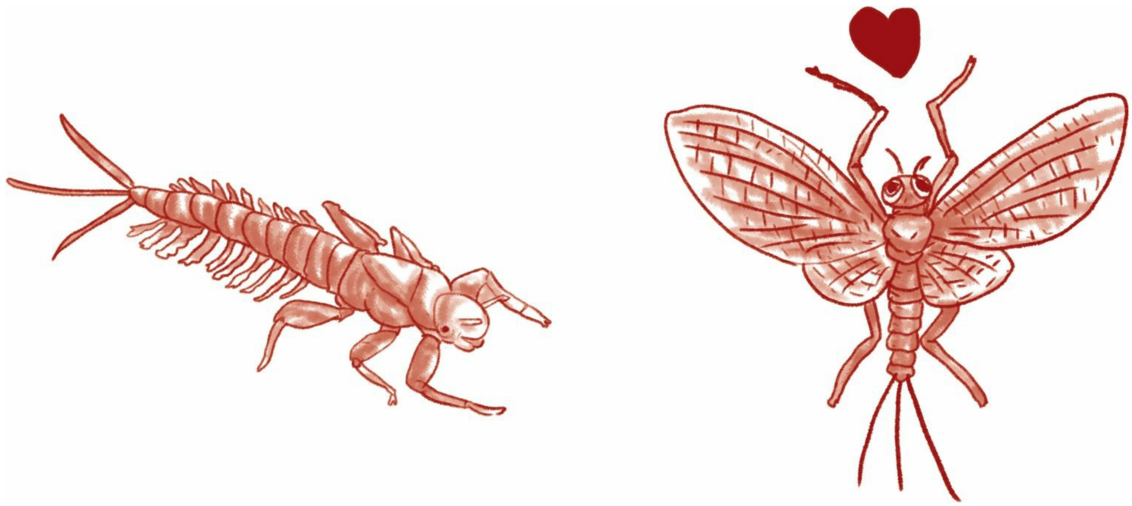
侧背板翅源学说如今较为主流，不过如今昆虫的翅并非机翼那样的“固定平板”，而是通过关节和身体连接，在肌肉的控制下，可以做出复杂且灵活的动作。很难想象，侧背板这种“体表外骨骼”结构是如何在延伸变形之后，变成如此灵巧的翅的。

气管鳃翅源说

如果说，“侧背板翅源说”对应的是有翅昆虫的“树栖起源”，那么“气管鳃翅源说”就对应了有翅昆虫的“水生起源”。这一理论认为，有翅昆虫的祖先经历了某个水生阶段，而它们原本在水中使用的呼吸器官可能最终演变成了翅。

最早的一批飞行者，如今被认为可能是蜉蝣的近亲——蜉蝣并不罕见，如果你在春天去水边散步，或许就能看见它们成群地飞舞。稚虫期的蜉蝣是生活在水中的，到了暮春时节，它们便会在某个时刻约好了似的集体羽化，长出翅膀，并在空中交配。成虫后的它们不再进食，寿命极短，只能存活数小时到数天，这才给人以“朝生暮死”的错觉。事实上，在羽化前，它们会在水中经历1～3年的稚虫期。

引起科学家注意的是，蜉蝣稚虫的体表会延伸出一些丝状、羽状的结构。这种结构的表面积很大，其中充满着细小的气管——这就是它们的“腮”，可以吸收溶解于水中的氧，排出二氧化碳。这种呼吸器官有个很形象的名字：气管鳃。气管鳃被肌肉包裹，可以在神经控制下灵活摆动，用来增加换气效率。这种灵巧的结构，的确很像是翅的雏形。而且，在许多石炭纪昆虫稚虫的腹部，也都发现了类似的结构。



（左）稚虫期的蜉蝣与（右）蜉蝣成虫

不过，现生蜉蝣的翅并不是由这些腹部的气管鳃发育而来的。如果再观察一下蜉蝣成虫的翅膀位置，你应该能意识到翅其实位于它的胸部。而且，无论是现生昆虫还是化石证据，都没有发现过在胸部长有气管鳃的案例。这又给气管鳃假说蒙上了一层阴影。

基于这个假说，我们只能推测：或许是更早阶段的某种水生六足生物，由于种种机缘，胸部的气管鳃最终演化成了翅。不过，推动这种转变的关键因素是什么？在过渡阶段，这种“不正常”的气管鳃又带来了怎样的好处？要解释这些其实同样困难。

不知道你是否联想到了“飞鱼”，有没有可能在某个阶段，翅其实是水生稚虫的水下动力装置，碰巧它们开发出了脱离水域的能力？不过，考虑到它们娇小的身躯和相对强大的水面张力，这种可能性也并不大。另一种脑洞则是：它们可能本来就生活于水面之上，像是小船一般，而过渡期的翅，其实就是它们的风帆[4]。

还是要强调，以上这些都还是处在假说阶段，若要盖棺论定，只能期待强有力的过渡类型化石证据被发现。甚至，现生昆虫的翅是否都有着同样的起源，也同样成谜。有观点就认为古翅类和新翅类的飞行能力可能是分别独立演化的，因为二者的翅结构有很大区别[5]。

昆虫大爆发

虽然“翅”的起源依旧迷雾重重，但起码现在我们可以明确：在石炭纪，昆虫肯定已经飞上了天空，这颗蓝色的星球，迎来了第一批飞行者。不难想象，最早的一批有翅昆虫，它们的飞行能力还谈不上高超。但飞行给这个物种带来的好处却不言而喻——这种前所未有的机动性，对于觅食、避敌、寻偶、扩散等的增益都是极其巨大的。

持续了近6000万年的石炭纪陆地，可以称得上是昆虫的天下。虽然此时的水边，两栖动物已经十分兴盛，而早期的羊膜动物也已出现，但论及物种数量、个体数量和多样化程度，都远不及昆虫来得繁盛[(6)]。在这数千万年的时光里，许多不同形状的昆虫相继出现，但大多数种类属于渐进变态的不完全变态类型。

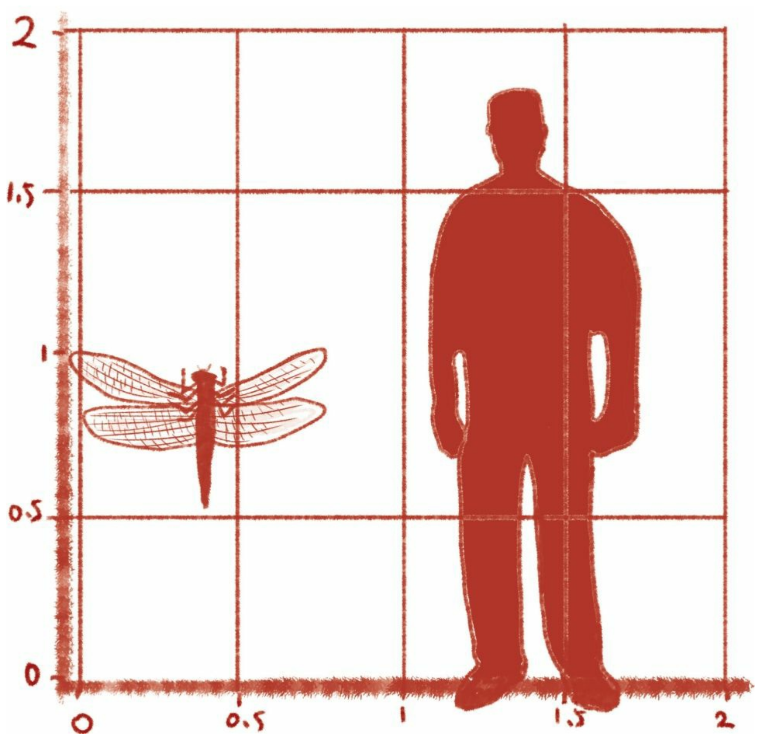
对于昆虫族群而言，另一个质变时期则是石炭纪的末期，一部分昆虫发展出了蛹，它们可以“完全变态”了。这又使得它们的翅膀发生了巨大的变化——它们翅膀出现的时间，从幼年期转为了蛹期。这就意味着，幼年期的昆虫，比如蛆或毛毛虫，就无须再和会飞的成虫共同竞争食物和生存空间了。

飞行所带来的好处是内因，促使昆虫大爆发的外因，则是自然环境。超强的机动性和繁殖力，使得它们并不惧怕地面和水中的捕食者。石炭纪温暖湿润的气候，又最适合它们生存与繁衍。这种气候，也对植物的生长极为有利，昆虫又向来与植物的关系最为密切。当时大多数种类的昆虫主要以植物为食。随着陆地面积的扩大，陆生植物从滨海地带向大陆内部延伸，并得到空前发展，形成大规模的森林和沼泽。这无疑大大拓展了昆虫的生存空间，也进一步催生了它们的迅速多样化。

巨虫时代

茂密的森林带来了极高的大气含氧量，与现在21%的含氧量相比，

那时大气中的氧气含量要高于30%，巅峰时更达到35%，也让部分昆虫走起了“巨大化”的发展路线：额外的氧气使得昆虫每次呼吸时能够得到更多的能量，从而维持它们的庞大身型。比较具有代表性的物种是巨脉蜻蜓（Meganeura monyi），它们与现生的蜻蜓拥有较近的亲缘关系，外观上也非常类似，但它们翼展可达70厘米，作为掠食者，它们以其他昆虫及细小的两栖动物为食物，算得上是当时的空中霸主[7]。与此同时，古网翅目（Palaeodictyoptera）昆虫的体形也非常巨大，拥有类似鸟喙的口器，除了两对相似的翅，胸背侧前端还有一对额外的小翅，一些种类的翼展也有55厘米，这对如今的昆虫来说是不可想象的。



巨脉蜻蜓

除了上述这些巨型昆虫，地面上也活跃着许多巨大的节肢动物。其中最为恐怖的或许是亲缘关系与如今的马陆较近的节胸属（Arthropleurida）。根据足迹化石，最大的节胸至少有0.5米宽、2.4米长。这种常被称作“巨型蜈蚣”的上古怪虫也是迄今发现的最大陆地无脊椎动物。复原图实在让我感觉不适，如果你好奇它的样子，请自行搜索

关键词[8]。蛛形类的普莫诺蝎（Pulmonoscorpius kirktonensis）也同样是可怕的存在，最大体长有70厘米，可能会以我们的四足先祖们为食。对于蜈蚣、蝎子等的恐惧，或许在那时就已经被刻进了基因吧。

鸟类与昆虫

并不怎么能够适应与虫儿们和平相处的我，十分庆幸自己生活在现代。不过，这并不妨碍我去思考：是什么样的原因，让昆虫最终放弃了巨大的体形变成如今这样。

大气含氧量的确是一方面——之前有一项研究，对10500多个活跃在过去3亿多年间的昆虫化石的翼展进行了分析，得出结论：当氧气含量上升时，昆虫体形增大；当氧气含量下降时，昆虫体形减小。昆虫的大小，的确与含氧量关系紧密。这一结论可以很好地解释含氧量大幅下降的二叠纪的昆虫体形，它们的确是显著变小了。但却无法解释，为什么大气含氧量同样超过30%的侏罗纪，没有再出现如此巨大的昆虫。

别忘了另一个外部环境因素——天敌的出现。在侏罗纪的晚期，第一批鸟类，开始了向天空进发的征程。化石证据显示，此时，有翅昆虫的体积的确停止增大了。科学家认为，对昆虫的体形来说，氧气是个重要的影响因素。但鸟类出现后，同样大气含氧量下的体形上限，就被大大压低了。

不过，读到这里，千万别以为这些大虫子都是被早期鸟类或者类鸟恐龙们给吃没的。诚然，由于体形过大导致的飞行机动性下降，大型昆虫可能会成为明显的攻击目标，但更有可能的是，机动性更强的鸟儿们或许仅仅是抢了大型昆虫的饭碗——它们同样会捕食其他的小型昆虫。这样的竞争，或许就导致了食物来源的不足，自然也无法再供养那么巨大的身型了。其实，如果根据现在的氧气水平推算，昆虫理论上的最大体形可能会比如今的大三倍[9]。正是因为鸟类的存在，才使得它们最终并没有那么大。

之前提过，三叠纪的卡尼期洪积事件也催生出了一拨“巨大化”的昆虫。比如肉食性的巨翅目（Titanoptera），其中较为出名的“巨型泰坦虫”（Gigatitan）[(10)]，长相介于螳螂与蝗虫之间，翼展也达到33厘米。这其实又带出一个有趣的问题：要知道，此时的天空中已经出现了“翼龙”，为何它们并没有和后来的鸟类一样，压制住昆虫的体形呢？一个可能的猜想是，翼龙的飞行技术不及鸟类，没有那么敏捷，这给大块头昆虫留出了生态位。

高超的飞行技巧

纵使没有了巨大的体形，也失去了食物链顶端的位置，我们也要赞叹昆虫演化的成功。即使抛开它们极强的适应性和繁殖能力不谈，单看它们所表现出来的飞行技巧，那也绝对是如今生物界的翘楚。而这一切，或许又是“小个子”带来的优势。相信只要你试图徒手捕捉空中飞舞的苍蝇或者在夜晚拍打蚊子，就一定深有体会！

前面也说过，与鸟翼不同，昆虫的翅并非源于某种陆行器官，可以说，昆虫的翅从一开始就是为飞行准备的。就翅和身体的比例而言，在所有会飞的动物当中，昆虫的翅堪称“迷你”。论构造，虽然比较简单，但关节活动能力却超出飞行脊椎动物。但若论起翅振动的速度，却远非翼龙、鸟类、蝙蝠之流所能比。它们振翅的频率高得惊人，蚊子、胡蜂、苍蝇等那烦人的嗡嗡声也由此而来。这也是它们能做出悬停、急转等高难度飞行动作的原因所在。不过，不同种类的昆虫，振动翅膀的频率也不尽相同，甚至相差很大。

蚊子、苍蝇所在的双翅目，蜜蜂、蚂蚁所在的膜翅目以及甲虫所在的鞘翅目，都盛产高频振翅能手——研究人员利用连续快速摄影机和高速电影拍摄机等仪器，把它们飞行时的动作拍摄下来，进行分析比较：熊蜂（Bombus Spp）每秒能振翅约110次；普通的苍蝇每秒约180次；蜜蜂每秒236次；雄性蚊子每秒能振翅150～700次，甚至更高[(11)]。要知道

我们把油门踩到底，汽车发动机的转速也不过每秒大几十转而已。

相比之下，脊椎动物中振翅频率最高的角蜂鸟（Heliactin bilophus），每秒仅在90次左右。不过，也并非所有的昆虫振翅速度都那么惊人——一般情况下，蝗虫的振翅频率为每秒18次，蜻蜓每秒10～13次，蝴蝶只有每秒5～6次。不过，这也都要比大部分鸟类振动双翼的频率高多了。

从运动方式而言，昆虫的振翅并非简单的上下运动，而是充满了一系列复杂的扭曲和旋转，随之形成的复杂涡流，为它们带来了足够的升力。这种升力，不仅足够让它们克服地心引力，甚至还能帮助它们携带超过自重的物体升空——根据测算，蜜蜂振翅产生的升力超过自身重力的3倍。

之所以能具备如此强大的飞行能力，或许要归功于它们控制翅的特殊结构。有一些利用翅根部肌肉的伸缩使翅振动，比如蝗虫和蜻蜓；还有一些，比如苍蝇、蚊子和蜜蜂，则利用其胸腔肌肉本身的弹性来振动翅膀。振翅频率还和体形大小、高度相关——体形越小，翅也就相应越短，也相应更轻薄。对于蜻蜓、蝗虫这样的大体型昆虫而言，它们脆弱的翅很难承受过高的振翅频率。好比你用最快的频率去扇一张A4纸，很容易扯碎它，但如果是一张小纸片，则完全不用担心。

或许，昆虫正是借助着对流体力学的深刻“理解”成了地球的真正霸主。要知道，已知的昆虫种类超过百万，据估计还有900万种尚未命名。而此时此刻，至少亿万只会飞的小家伙与我们共享这颗星球！

小知识点补充

昆虫有几对翅？

大部分的昆虫，都有两对翅，但苍蝇和蚊子之类双翅目

（Diptera）昆虫却只有一对。在演化中，它们的后翅变成了两根棍状的平衡棒。在飞行时，可以起到保持平衡的作用。如果摘除这对器官，这些昆虫不但无法飞行，还会迅速死亡。

昆虫中最为多样化的鞘翅目（Coleoptera），也就是我们常说的甲虫，则将前翅演化成了外骨骼，如同盔甲一般，保护用于飞行的后翅和身体。目前全世界的甲虫，约182科，约有35万种，超过全动物界其他所有目的总和。除了海洋和极地，其他地方都可以发现它们的身影。

空中巨无霸，迷人的谜题

与动物登陆的顺序一样，在昆虫征服天空亿万年后，脊椎动物作为天空的后来者，最终也有三条支系成功起飞：翼龙、鸟类以及蝙蝠。当然，硬要算的话，我们人类算是第四条。有着完全不同的生理构造、与昆虫相较之下巨大无比的体形，脊椎动物的飞向蓝天之路到底是如何完成的，这便是接下来想带大家去回溯的演化历史。而在这三条支系当中，作为唯一已经彻底灭绝的古老物种，翼龙，无疑又是最迷人，也充满着谜题的一条支系。

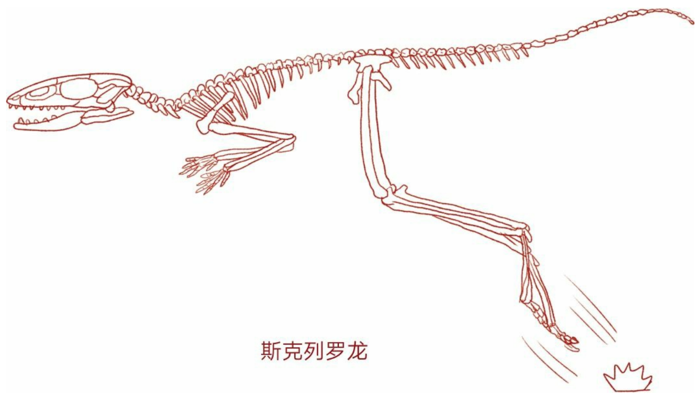
翼龙的确有很多让人误解的地方——对于普通人而言，最大的误会或许就是把它当成一种恐龙了。虽然之前已经多次强调，但还是再啰嗦一下：尽管与恐龙生存的时代相同，但翼龙并不是恐龙。翼龙并非三角龙、梁龙与现代鸟类的最近共同祖先的后代，更不是蜥形纲下蜥臀目、鸟臀目的物种。它们属于翼龙目（Pterosauria），是由一支与恐龙祖先关系很近的主龙类生物演化而来。

不过，翼龙从兴起到灭亡的时间，倒是与恐龙在陆地的存续时间几乎重合——最早出现在约2.3亿年前的晚三叠世，并与恐龙一道灭绝于

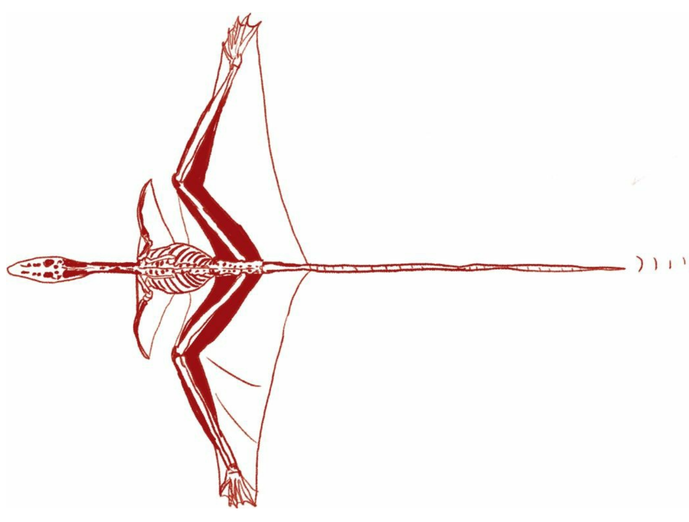
6600万年前的晚白垩世。

翼龙的起源

为了适应飞行，翼龙的骨骼结构出现了高度的特化，它们的骨头是中空的，当沉积物堆积在它们身上时，骨头会被压平。所以，大多数翼龙化石的保存情况并不好，它们的化石记录存在着诸多的间断，这也为研究翼龙带来了一定困难。



斯克列罗龙



沙洛维龙

因此，关于翼龙目的起源，又是一个未解之谜。迄今为止，没有找到它们最直接祖先的化石证据。生存于三叠纪晚期的一种鸟颈类主龙

——斯克列罗龙（Scleromochlus），被认为可能是翼龙类祖先的近亲。这是一种善于行走和跳跃的小型动物，身长约18厘米，后肢相当修长，或许以昆虫为食。

沙洛维龙（Sharovipteryx），则是已知最早的具备滑翔能力的蜥形纲物种。它们修长的后肢间长有翼膜，展开时宛如一架三角翼滑翔机。可能跳跃至空中，并用它们的翼膜控制降落时的方向。也有观点认为它们可能是翼龙类的祖先，但由于翼膜的位置和过于短小的前肢，这一点尚存争议。

无论是斯克列罗龙还是沙洛维龙，它们善于奔跑或跳跃的特点似乎都给出了这样一条线索：翼龙飞向天空之路可能是“从地面往上”的，这也是如今较为主流的观点。也有人认为，翼龙祖先的飞行之路可能是从攀爬悬崖开始的。在2008年，一项研究则认为早期的翼龙应该是栖息于树间，以昆虫为食的小型动物，这又为本就迷雾重重的翼龙起源问题增加了更多的“雾气”[12]。

但不管怎么说，无论是为了寻求空中肥美的昆虫，又或者是为了躲避来自地面的威胁，翼龙最终成功飞上了蓝天。在此后的一亿七千多万年里，它们始终是天空无可争议的霸主。即使后来鸟类出现了，挤占了不少原本属于它们的生态位，但“顶级飞行掠食者”的宝座却始终被翼龙占有。

提起翼龙，或许大部分人的印象来自《侏罗纪公园》里那些可以轻易把人拽走的大家伙。但事实上，作为一个经历了三叠纪、侏罗纪和白垩纪的物种，翼龙的多样性也是足够丰富的。尽管轻薄的骨骼使得化石的保存非常困难，但目前我们也已经发现了200种左右的翼龙化石——不难看出，它们的个头有大有小，形态上的差别也很大。而且，在很长一段时间里，它们的个头并不算很大。

第一批出现的翼龙大多长有牙齿和长长的尾巴。比如，生活在三叠纪晚期的沛温翼龙（Preondactylus），翼展只有45厘米，相比之下，鸽

子的翼展通常有60厘米。它们修长的腿很容易让人联想起它们的祖先，前肢也依然可以用于攀缘。

在晚三叠世到晚侏罗世之间的漫长岁月里，这些长有长尾的翼龙，都是当时天空“龙族”的主力。在侏罗纪中期，则兴起了一批短尾无牙的类型——翼手龙亚目（Pterodactyloidea）。它们被认为是更先进的一类翼龙，多样性也更为丰富。比如，生活在1.2亿年前小巧的森林翼龙（Nemicolopterus），翼展仅25厘米，和燕子差不多。



沛温翼龙

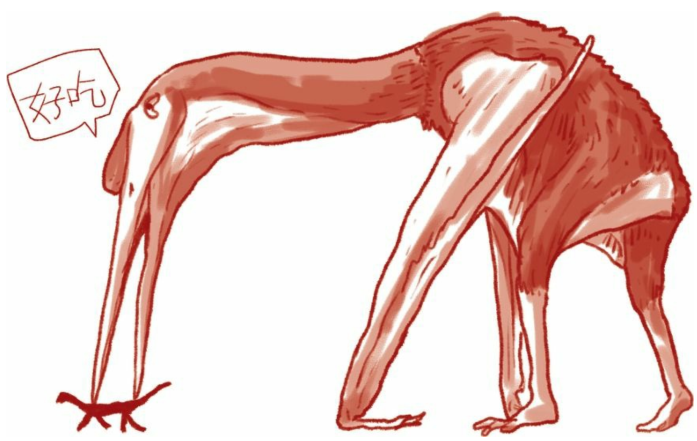


森林翼龙，已知最小的翼龙之一，化石发现于中国辽宁。

但到了白垩纪后期，翼手龙亚目的翼龙们则呈现出了“巨大化”的发

展趋势，奠定了后期翼龙的基本面貌，随着影视作品的传播，它们的形象，也成了人们对翼龙的第一印象。其灭绝的一部分原因，根据推测是被后来者鸟类所逼。虽然是天空的后来者，但鸟类在空中机动性上，占据了更大的优势，于是乎，白垩纪中后期，和鸟体形接近的中小型翼龙，由于竞争不过让出了生态位，最终完全灭绝了。

只有超大型的翼龙，让鸟儿们望尘莫及。更有意思的是，和鸟类中出现重返陆地的种类相似——由于白垩纪的海侵现象严重，到处都是小块大陆和岛屿，一些生活在与世隔绝的岛屿上的翼龙，甚至演化成了同样体形巨大，却更擅长陆地行走的版本。比如哈特兹哥翼龙（Hatzegopteryx），直立起来高达5米，根据推测是以侏儒化的小恐龙为食。

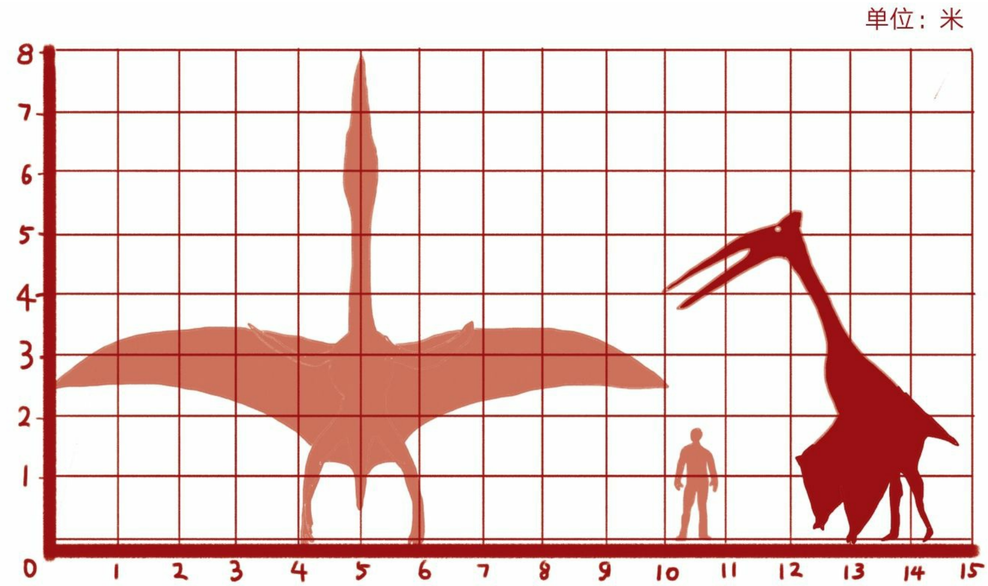


哈特兹哥翼龙

以当时的海陆环境和生态系统来说，这种策略不能不说是成功的。但已经读到这里的你，自然也深知“巨大化”的劣势——“转型困难”。白垩纪晚期，一些大陆开始重新融合，全球气温下降，岛屿急剧减少，伴随着大型猎物们的日益缺失甚至消失，再结合小行星撞击地球这样的灾难，它们最终也只能同陆地的恐龙、海中的沧龙一起灭绝，成为后来者唏嘘不已的昔日空中霸主了。

空中巨无霸

既然说到“空中霸主”，这其中令人印象最为深刻的，恐怕便是生活在6800万年前到6600万年前的风神翼龙（Quetzalcoatlus）了，它们也是这颗星球上曾经出现过的体形最大的飞行生物。它们的名字来源于中美洲文明普遍信奉的最高神祇：羽蛇神（Quetzalcoatl）。



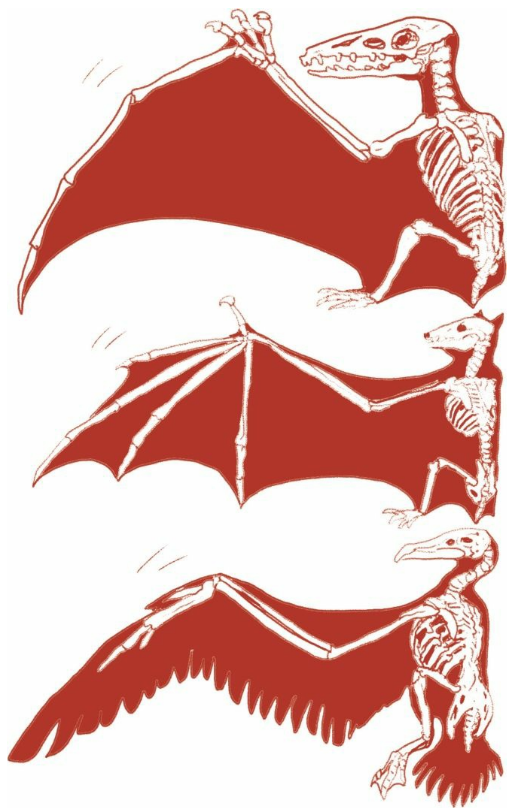
风神翼龙

龙如其名，风神翼龙可以说是霸气非凡：站在陆地上的时候，远远看过去，风神翼龙很像是长颈鹿与鹳鸟的合体。它们有6~7米高，光脖子就有2米多长，与长颈鹿不相上下，还有着巨大的头骨和细长无牙的大嘴。更刺激的是它们展翅飞翔的时候——翼展有11~15米宽，堪比一架小型飞机了。

清楚地记得，我曾在自然博物馆里仰望一只巨型翼龙的骨架许久。想象着这种生物当年盛况的同时，也暗自庆幸：幸好如今的我们并不需要和它们共享天空。虽然体形极其巨大，但它们的体重却惊人地轻：根据推测，成年风神翼龙的体重或许只有250千克。虽然这已经相当于三四个成年人的体重了，但对比一下与它们体形相仿的长颈鹿的体重，你就明白了——雄性长颈鹿的体重可以接近两吨，即使是雌性也有近一吨。

之所以有这种与体形相比反差巨大的体重，主要归功于它们“清奇”的骨骼——它们的骨骼几乎和吸管一般，这种轻薄的管状骨既轻巧又能承受住极大的压力，有些骨骼里甚至充满了空气。前面也说到，它们的头骨很大，虽然目前还没有成年个体的头骨化石出土，但仅仅是未成年的个体，头骨就已经长达一米。为了尽可能地节省重量，风神翼龙的眼眶前方有着巨大孔洞，叫眶前孔，差不多占了头骨全长的1/2。

飞行装备



翼龙、蝙蝠与鸟的飞翼结构对比

当然，光有轻巧的骨架，还不足以让一个250千克的大家伙自由翱翔。毕竟，现如今最大的飞鸟之一“南美秃鹫”体重不过10千克左右；即使算上已知的最大鸟类，生活在600万年前的阿根廷巨鹰，体重也不到75千克。特殊的飞翼构造才是翼龙最终得以“巨大化”的关键：它们充当翼指的第IV指[13]非常夸张地延长，如同三角滑翔翼的骨架般简洁。巨大

的翼手膜从翼指尖一直延伸到后腿，除此之外，在肩部和腕部之间、后腿和尾巴之间还分别有前膜和尾膜。第V指退化不见，另外三根手指则外露为小爪。

不知道有没有人和我一样担心，那么薄的翼膜是否有足够的强度？虽然，从化石的角度而言，这种组织要保存下来十分困难，但好在，现在依然发现了一些标本。古生物学家发现，其中应该充满了放射状的细小纤维[(14)]，以十字方式互相交错、重叠，既轻薄又强韧，如同伞面一般。或许正是这样的超轻骨架和超薄翼膜的构造，才最终成就了地球史上的第一飞行巨兽。而不少学者也认为，风神翼龙的巨大体形，已经接近飞行脊椎动物的极限了。

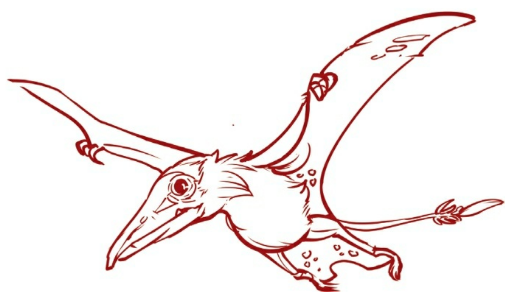
当然，无论如何，要用“轻巧”来形容这种生物，都是有些不合适的。所以，新的问题随之而来：能飞是一回事儿，擅长飞又是一回事儿——它们的飞行能力到底如何？会不会由于体重的缘故，不能飞行太久，以至于需要时不时回到地面休息和补充体能呢？

回答这个问题之前，我们先了解一个关于飞行的概念：风力载荷。对于动物来说，就是飞翼面积与体重的比值。这个概念在滑翔这件事上非常好理解——由于升力和重力的共同作用，在展翅不动且无风情况下，滑翔机、滑翔伞或者其他的飞行生物，都是边前进边缓缓下降的。目前设计最理想的滑翔机，差不多可以做到每下降一米的同时前进四米，但翼龙似乎可以做得更好，而翼展接近15米的风神翼龙更是把这一点做到了极致。大部分的时候，它们并不需要扇动飞翼——巨大的翼所给予的上升力使得一阵轻风便足以让它们飞得更高。一旦遇到合适的上升气流，只要稍稍扇动或者调整一下飞翼，就能轻松翱翔数百千米。

顺便补充一下，不怎么扇动飞翼，也和它们日益巨大的体形有关。膜翼这种结构相对更容易散热，这就意味着需要储备更多的热量来抵消，而减少扑翼的次数、更多利用滑翔就不失为一种节能的好方法。而高频的扑翼也更容易导致膜翼破损，一旦破损，则很难恢复。这样一

来，发展出更大的翼，获得更优的风力载荷，就成了一种自然而然的选择方向。后期的巨型翼龙也就逐渐失去了频繁扑翼的能力，只能以滑翔和盘旋为主了。

至于翼龙的外观，也请放下来自《侏罗纪公园》的刻板印象——它们极有可能都是毛茸茸的。虽然目前还没有发现它们长有羽毛的证据，但的确发现不少翼龙的体表覆盖着类似哺乳动物毛发的丝状结构[(15)]。无论是长尾的索德斯龙（Sordes）还是短尾的热河翼龙（Jeholopterus），它们的头部和身体都长有毛发。根据推测，出于飞行的需要，翼龙类也是温血动物，而毛发能很好地起到保温作用。



索德斯龙



体表覆盖毛发的热河翼龙

如何起飞？

还有一个问题也需要我们认真讨论：滑翔伞也好，滑翔机也罢，起飞的时候，都是需要借助外力的。无论是高高的山坡，还是悬崖边，又或者借助螺旋桨起飞和爬升。那翼龙呢，总不见得张开翅膀傻乎乎地等

风来，或者慢悠悠地爬到高处，再展翅一跃吧？

其实关于翼龙具体的起飞方式，也算是一个未解之谜，毕竟没人亲眼见过活着的翼龙。先来看看如今的鸟类是如何起飞的：对于许多常见的鸟类来说，它们的后肢要比前肢更加强壮，吃过鸡腿和鸡翅的朋友肯定都明白这一点。其中的一个原因，就和这些鸟类的起飞动作有关——它们会借用后肢往下蹬的力量，取得些许高度，同时鼓动翅膀完成起飞。如果你想象不出这个画面，可以观察一下小区里的麻雀，又比如天鹅、鹈鹕、信天翁这样的大鸟，由于身体太重，在起飞时则会额外加上一段助跑。

因此我们有理由相信，体形和如今鸟类差不多的早期翼龙，可能也会用类似的起飞方式。或者，借助有爪的前肢先爬到高处，随后跃入空中。但对于白垩纪时那些体形巨大的翼龙来说，它们该如何起飞，却很难套用这样的姿态。它们前腿的力量是后腿的几倍[16]，对化石证据的模拟表明，对于许多巨大的翼龙而言，它们并没有足够的肌肉，无法仅通过拍打飞翼离开地面。

之前有一项研究认为：巨型翼龙或许是四肢配合跳到半空，继而起飞的。这有点像学生时代体育课时曾经学过的跳马动作——起先它们有点前倾的样子，先蹋后腿，然后猛撑前肢离地。不知道你是否会担心，它们纤细且中空的前肢骨骼能否承受住如此巨大的冲击？化石分析发现，这些类似蜂窝状的中空结构，在某些特定的位置呈现方向一致的排列，因此可以承受住类似的冲击。

与如今的飞机一般，起飞前，它们应该会判断一下风向，选择迎风面；起飞时，它们或许会侧举着飞翼，离地后随即展开巨大的飞翼，形成巨大的空气阻力，减缓速度，接着便能顺势滑翔起来。根据分析，看上去行动缓慢的这些巨型翼龙，整个起飞过程或许还不到一秒钟。特别要说明一下，由于目前并没有相关的足迹化石来支持或反驳这一推论，对于讲究证据的科学研究来说，这仅仅是一种较为合理的推测而已。

地面的生活

翼龙飞行的事情聊得差不多了，再来说说它们在地面的状态吧。不处于飞行状态的时候，翼龙都是如何行动的呢？在地面行走时，它们是更像鸟那样仅靠双足，还是像蝙蝠那样四肢并用呢？前面说过，由于翼龙的骨骼非常薄，要留存为化石非常困难，从而产生了大量的争论。好在，科学家发现了几处极为珍贵的足迹化石证据。比如，通过2011年在我国山东即墨发现的化石，可以判断出相应的翼龙是典型的四足运动方式。从周边的水痕来看，这只翼龙很可能正在涉水或寻找食物。而且，行走起来还是相当灵活的。

2016年，我国学者在新疆哈密发现了数百枚来自1.2亿年前白垩纪地层的天山哈密翼龙蛋，则反映出另一个有趣的事实：与某些现代鸟类一样，天山哈密翼龙会成群地产卵；甚至与一些现代鸟类和海龟一样，天山哈密翼龙还会重复利用同一个筑巢区。曾经，很多古生物学家都认为翼龙在卵中会发育到相当成熟的地步，以至于从卵壳中出来之后不久就能飞行。但起码天山哈密翼龙的化石表明，它们是一种生长缓慢的翼龙，幼年时期需要用4条腿奔跑[(17)]。

蓝天统御者，毛茸茸的恐龙？

这本书读到这里，相信很多朋友都已有了这样一个常识：鸟类有极大的可能就是起源于恐龙，或者说如今的鸟类就是恐龙的直系后裔！但每每想到这一点，其实依然会很惊愕——小巧可爱且毛茸茸的鸟类，是怎么和巨大的“恐怖的蜥蜴”们扯到一块去的。

其实这个科学共识，也就是最近20多年才形成的。在此之前，学术界可以说是争论不休。一派认为，鸟类的直系祖先应该是恐龙与鳄鱼的共同祖先、原始的主龙类下的另一个分支；另一派则认为它们和原始的鳄鱼有着更近的关系；还有一派则坚持如今看来更靠谱的“鸟类是兽脚

类恐龙的后裔”。

不过有意思的是，第三种鸟类起源假说恰恰是最早提出的。早在1868年，赫胥黎（Thomas Henry Huxley）就认为始祖鸟（Archaeopteryx）和美颌龙类（Compsognathidae）的化石结构十分类似[(18)]。但随着更多化石的出现，此后很长一段时间，一个绕不开的矛盾却困扰着这个学说：在侏罗纪地层发现的始祖鸟显得很“先进”，但看上去更为原始的兽脚类恐龙似乎在白垩纪才大量出现。

之后，“原始主龙类起源说”和“鳄形类起源说”这两派假说开始兴盛。直到20世纪70年代，耶鲁大学教授约翰·奥斯特罗姆（John Harold Ostrom）将恐爪龙类和鸟类骨骼相似性的比较结果公布后，这才让“恐龙起源说”又一次成为主流。而前面提到的那个矛盾，则随着越来越多的原始兽脚类恐龙化石从侏罗纪甚至更早的地层中被发现而不攻自破了。

先有羽毛还是先有鸟？

虽然始祖鸟长有牙齿及一条长尾巴，但头部、爪和翅膀都与现代鸟类神似，关键的是，它们还披着一身与如今鸟类极其相似的羽毛，这也是现今鸟类所独有的一种构造。而始祖鸟之所以在最开始被认定为鸟，很大程度也是因为它们的那身“毛”。

从化石证据的角度来说，带有羽毛的化石其实早在1860年就在德国的索伦霍芬采石场被发现了。不过，这是一件单纯的羽毛化石。在这之后的1862年，第一具完整的始祖鸟化石就出土了，这具化石因为种种原因，后来被送到了伦敦大英博物馆，被称为“伦敦标本”。这具标本虽然羽毛的痕迹非常清晰，但骨骼保存得并不是特别完整。而在此之后不久，索伦霍芬的采石场中又发现了一件始祖鸟化石，这具化石就保存得非常完整了。之后，它被送至德国柏林，这就是名声显赫的始祖鸟“柏林标本”，也就是教科书上最常见的那具标本。

索伦霍芬后来陆续又发现了多件始祖鸟化石。一直到21世纪，也依然有新的始祖鸟化石出土。不过，别看始祖鸟的化石发现了这么多，可它们都属于一个属，即使将始祖鸟属再细分一下也就两个种[19]。这一现象从1860年持续到了1996年。

这意味着什么呢？在这136年里，虽然时不时冒出“一只始祖鸟”来，但是没有任何新的能够早过始祖鸟的带有羽毛的物种被发现，好像始祖鸟就是一个凭空出现的羽毛物种一样，前无古人后无来者。或者说，在当时整个的中生代所发现的化石中，除了原始哺乳类和晚于始祖鸟的早期鸟纲物种，就只有始祖鸟是带毛的了。如果仅仅看这些证据的话，似乎羽毛在地球史上忽然出现，随后便消失了。在之后，又突然出现在了鸟类身上。

一个重要的转机出现在了1996年。在我国的辽宁省北票市四合屯乡，一位农民在上山途中采集到了一块带有化石的石板，并将化石劈成了完整的两片。他这一劈不要紧，直接为“恐龙长啥样”和“鸟类起源”这两大古生物学疑案指出了一条新路。

这块石板来自大名鼎鼎的热河古生物群地层，其中藏着一具非常别扭的化石。从骨骼上来看，属于美颌龙类，但它又十分明确地披着一身类似“羽毛”的结构。这也是除索伦霍芬的始祖鸟外，第一块带有“毛”的蜥形纲物种化石。它便是如今大名鼎鼎的中华龙鸟（Sinosauropteryx）。

是不是有点混乱了？一只长了羽毛的美颌龙名叫中华龙鸟。这到底是龙还是鸟？要知道，这件化石，在当年的古生物学界可是掀起了一场著名的“龙鸟大战”。

小知识点补充

对恐龙的刻板印象

如果你在读这本书之前，对恐龙并不是非常了解的话，那或许在你的印象里，恐龙应该都是“光秃秃的，长满了鳞片一样的东西，像只放大了的奇怪蜥蜴”。毕竟，早些年的电影和科教片也大都是这样表现的。

这种经典的恐龙形象其实是在恐龙被发现之初，由当时的大英博物馆馆长、生物学界的泰山北斗理查德·欧文爵士（Sir Richard Owen）在1841年描述恐龙之初就确定下来的。

最初发现的恐龙化石，与蜥蜴有很多相似的地方，当时的古生物学家自然会将其与蜥蜴相关联。恐龙的学名（Dinosauria），同样出自欧文爵士。其拉丁文含义就是“恐怖的蜥蜴”。

毛茸茸的恐龙



中华龙鸟

设想一下，当年的科学家，遇见了一只长毛的恐龙化石，这种震撼程度，是不是和看见了一只“长满鳞片的鸟”差不多啊？在欧文描述恐龙之后的一百多年里，虽然恐龙的形态千变万化，总的来说还是符合“恐

怖的蜥蜴”这个基本设定的。可到了中华龙鸟这里，“画风”不对了。当这块化石送到了北京自然博物馆后，众多学者便为了这块化石“是龙是鸟”开展了一场大辩论。

当时学界普遍认为，羽毛是鸟类的专属，不可能出现在恐龙身上。可化石又摆在这里，骨架上看完全就是一只恐龙，但这毛茸茸的痕迹也是板上钉钉的。既然进退两难，那学术界也就不得不重新审视恐龙与鸟类的关系以及各自的定义了。争论到最后，学术界又给这只中华龙鸟的“毛”做出了解释——这层毛状物为皮肤衍生物，并不是真正的羽毛，至此这场鸟与龙的争论才算尘埃落定。事情到这里还没完，“龙鸟大战”的硝烟还未彻底散去，带毛的恐龙又被发现了。而且，不是一个，是一大堆。

同样是在1996年，原始祖鸟（Protarchaeopteryx）[20]也被发现了。虽说与始祖鸟只有一字之差，也都有“毛”，但它们却并不是同一物种，亲缘关系也不算近。

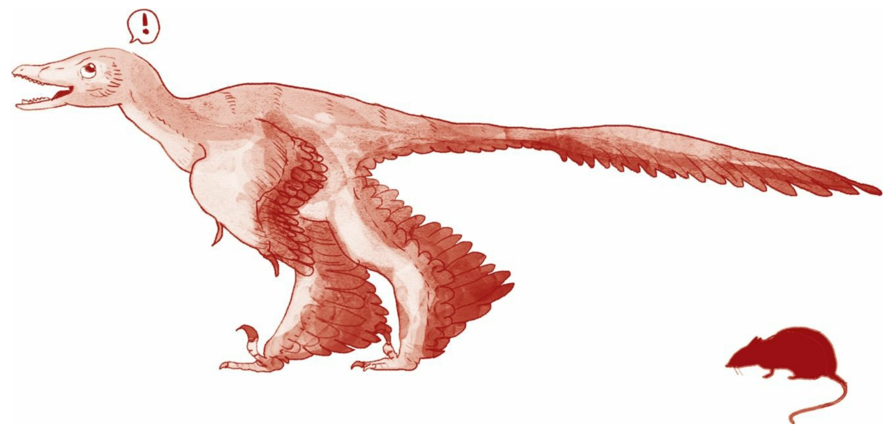
1998年，辽宁北票市又出土了一件化石。虽然这件化石并没有明显的毛发痕迹，但也同样不可轻视。因为，这件被命名为尾羽龙（Caudipteryx）的早期窃蛋龙类（Oviraptorosauria）保存了完整的尾综骨这一结构。

尾综骨是鸟类脊椎最末端一个用以固定尾部羽毛的结构，具备这种结构便意味着它的尾部应该也长有羽毛。这样一来，过去所有关于窃蛋龙类的外形复原就可能都是错的，它们没准都长有一身的毛[21]。

接下来的1999年，还是在那个热河生物群，又发现了一件小恐龙的化石，被命名为千禧中国鸟龙（S.millenii），属于中国鸟龙属（Sinornithosaurus）。虽然和中华龙鸟的名字神似，但中国鸟龙和中华龙鸟在分类上的关系并不近，分属不同的科。不过，从“鸟龙”这一命名上应该能感觉出来，这时候科学家已经比较清楚地知道自己面对的是一只恐龙了。

中国鸟龙对于生物界最大的贡献，在于化石上保存了完整的羽轴痕迹。在当时，那可是在恐龙身上发现的最接近如今鸟类的羽毛，或者说就是真正的羽毛。至此，古生物学家终于可以明确：恐龙身上的确可以长出鸟类这样的羽毛。

顺带提一下，中国鸟龙还是目前已知最早带有毒液的生物。2009年，科学家在检查一具中国鸟龙的头骨时发现这件标本的牙齿能够分泌毒液，就像蛇类一样。次年，另一群科学家在研究该物种羽毛化石的细胞结构时发现，这家伙也许具有不同颜色的羽毛。



中国鸟龙

其实前面提到的几个化石证据，也呈现出这样一条脉络——从侏罗纪到白垩纪，羽毛的形状由简单的丝状羽毛开始，循序渐进，直到发展成带有互相勾连结构的、非对称的、具有飞行功能的羽毛。这个演化过程其实与现代鸟类羽毛的发育过程十分类似。

更有意思的是，随着越来越多化石证据的出现，如今我们认为，不仅仅兽脚类恐龙身上有羽毛，在坚尾龙类似松鼠龙（Sciurumimus），甚至原始鸟臀类恐龙天宇龙（Tianyulong）的身上，都发现了原始羽毛的痕迹，这甚至暗示着恐龙的主龙类祖先或许早已披上了绒衣。换句话说，长着毛或者羽毛的恐龙，可能遍地都是。

这样想来，羽毛诞生之初，应该不是用来飞的了。现在的观点认

为，早期的羽毛更像是用来实现温度调节和信息交流的工具。羽毛中色素体的发现，表明早期羽毛也是有颜色的，从而更进一步支持了信息交流，特别是在性选择中起到装饰的作用[22]。

2018年年初，《自然—通讯》在线发表了我国科学家的研究成果，报告了一件发现于河北青龙，距今大约1.6亿年的近鸟龙科（Anchiornithidae）小型恐龙——巨嵴彩虹龙（Caihong juji）化石。科研人员在这件化石的头颈部、胸部以及尾基部等处的羽毛中，发现了一种从未被报道过的，扁饼状的色素体。而且这些色素体，与现生蜂鸟类的一些色素体非常相似。这也间接证明了，在鸟类演化的早期，羽毛就有可能具有非常鲜艳的颜色。

这件化石还打破了最早披羽恐龙的纪录。同时，它还是最早具有“不对称飞羽”的动物，比之前所发现的最早具有这种构造的始祖鸟，早了至少一千万年。回想一下，现今鸟类翅膀上的羽毛，特别是翅膀最外侧的飞羽，羽轴两侧是不是一边宽些一边窄些？目前科学界普遍认为，出现这样的羽毛构造是鸟类能够飞上蓝天的一个重要演化环节。

它的尾部形似芭蕉叶，大片的飞羽沿着尾骨两侧对称排列。在尾羽上，还保存了羽小枝这一构造，这和现生鸟类的完全相同。这都说明，起码在1.6亿年前的近鸟龙族群中，有关飞行的演化就已经出现了。

可以自豪地说：中国古生物学家的贡献，为结束“鸟类起源之争”起到了至关重要的作用。仰赖于辽西热河生物群及新疆、内蒙古等地区一系列关键性的化石发现，再结合全球一些新发现的证据，可以说，如今的科学家不仅仅把鸟类牢牢锁定在兽脚类恐龙这一支当中，更进一步确定在手盗龙（Maniraptora）的序列里。如今我们可以说，鸟类与恐爪龙类并列，处于兽脚类恐龙演化的最末端，这也是学界普遍接受的观点。

小知识点补充

毛茸茸的“霸王龙”

现在普遍认为：一身毛的霸王龙也许才是真的霸王龙形象。或者说，即使经典的霸王龙是光秃秃的，但它的祖先也应该是毛茸茸的，类似如今的非洲象。

证据同样出自辽西，2004年，中国科学家发现了一具属于暴龙超科的恐龙化石，命名为奇异帝龙（Dilong paradoxus）。这是目前发现的最早的暴龙超科物种之一，生活于晚侏罗世，目前所发现的个体，体长只有1.6米左右。在化石上，同样发现了类似毛发的印痕。科学家也由此确认，暴龙超科最初是由小型兽脚类发展而来。他们进一步推测，暴龙超科的成员，可能全身或局部长有这类毛发衍生物，也可能在幼年期生有类似构造。

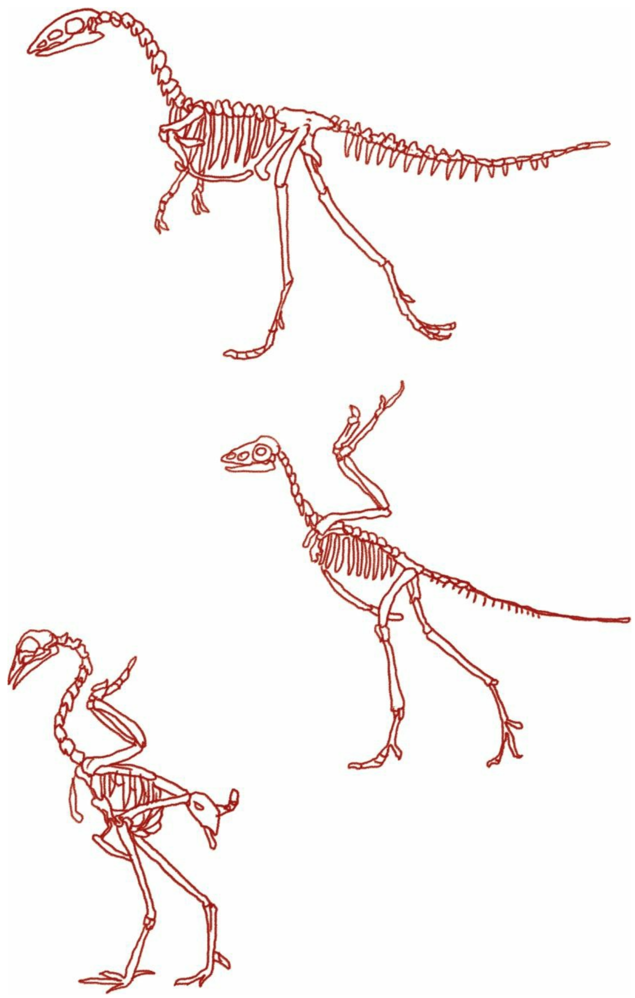
这样想来，幼年小短手，还真有点萌呢。

相似的骨骼特征

如果说，上述的羽毛是证明鸟类源于恐龙的一条“明线”，那么，骨骼结构的联系恐怕就是“暗线”，甚至对于古生物学家而言，骨骼证据往往更为直接。比如，如今我们认为鸟类所独有的叉骨和半月形腕骨，其实在兽脚类恐龙中就已经有了雏形；越来越完整的化石证据链也表明，在兽脚类恐龙演化过程中，无论是颅腔的内轮廓还是前肢的加长，都呈现出与现代鸟类日益接近的趋势。

随着越来越多保存完好的化石被发现，人们对化石的观察也越来越仔细，一些之前没被注意到的特征也纷纷为鸟类的兽脚类恐龙起源作出佐证。几乎所有兽脚类恐龙的颈椎和前面一部分背椎都有明显的孔洞，这意味着这些恐龙拥有类似鸟类的气腔结构和呼吸功能。这些恐龙很可能具有较高的代谢率，说不定还能在一定程度上维持较高体温。更令人惊讶的是，这种气腔结构在鳄鱼和巨蜥中也存在，因此这一结构很可能

可以追溯到主龙类祖先。根据分析，它们最初的出现可能仅仅是为了减轻体重。



美颌龙（上）、始祖鸟（中）、鸡（下）的骨架对比

不过，依然还是有些疑点存在：比如，原本具有五根手指的前爪是如何变成翅尖的。过去认为，翅尖是由恐龙前肢的第Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ指愈合而成，对应我们的拇指、食指和中指。但发育生物学家对现今鸟类的研究却发现，鸟类的翅尖似乎源于第Ⅱ、Ⅲ、Ⅵ指。幸好，近几年对多件兽脚类化石的研究表明，在整个演化序列中，五根手指中的部分可能会消失再出现，或两两融合，甚至因为横向错位移动而难以分辨究竟是第几指。发育生物学后来也观察到了类似情况，这种矛盾或许可以化解。

小知识点补充

飞行专家

现存的诸多鸟类，可以说是毋庸置疑的飞行好手。为了适应飞行，它们的身体高度特化：长满羽毛的翅膀展开时，外侧羽毛覆盖在相邻羽毛内侧的边缘上，这样每根羽毛都具有一定的旋转能力。两翅不断上下扇动，就会产生巨大的下压抵抗力，从而快速向前飞行。通体的羽毛也使得鸟类呈现流线型外观，最大限度地减小了空气阻力。

除了轻盈的骨骼和强健的胸廓，继承自恐龙的优秀的双重呼吸系统也保证了它们在飞行时能够有足够的供氧。同样作为恐龙遗产的排泄系统，也进一步减轻了体重——它们没有膀胱，直肠也短，排泄物并不能在体内长时间驻留。

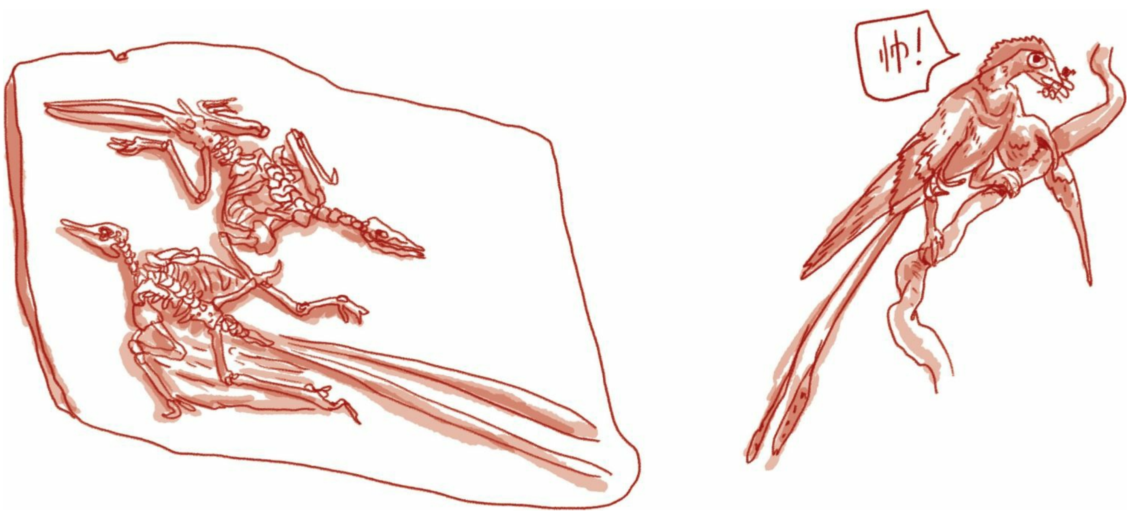
鸟类的飞行起源

现在你应该不会再认为，鸟类是恐龙中第一批成功飞向蓝天的了吧？显然，这种认识存在问题。根据分析，还不属于鸟类的始祖鸟，的确能够进行短距离飞行；又比如小盗龙（Microraptor），拥有前后两对“翅膀”，小腿上长有羽毛，显然具有滑翔的能力。可以这么说：在最早的鸟类飞向蓝天之前，诸如体形缩小、前肢加长、骨骼中空、前脑增大、飞羽产生等一系列适应飞行的特征，就已经在兽脚类恐龙中出现。

话虽如此，但鸟类（或者说恐龙）的飞行起源问题依然值得讨论。一直以来，树栖起源说和奔跑起源说都争论不休。树栖起源说认为，最早的鸟类其实是某种生存在树上的小型生物为了方便在各个树木之间移动而逐渐演化成的，是从上往下的；奔跑起源说则认为，某些小型生物为了逃离大型捕食者的追捕，在快速奔跑中逐渐腾空而起，是从下往上

的，说白了就是为了逃命。

不过，自从1995年一件化石被发现后，这场争论的天平便明显地倒向了“树栖起源”这一方。还是在辽西，我国古生物学家发现了孔子鸟（Confuciusornis）。与上文出现过的任何一种恐龙不同，它是货真价实的一种鸟，生活在晚侏罗世或早白垩世，[23]也是目前已知的最早拥有无齿角质喙部的鸟类。

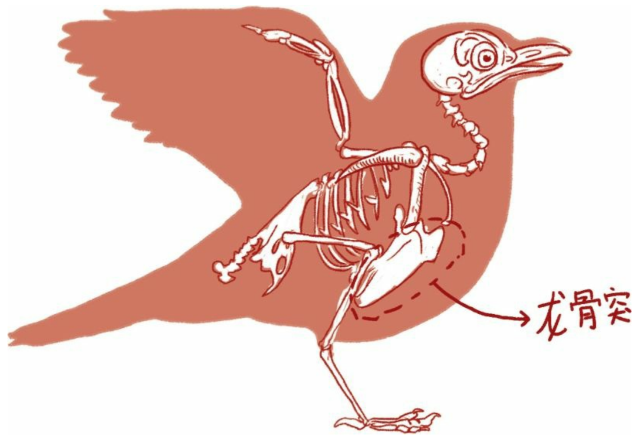


疑似孔子鸟“夫妻”

首先，它具有大而弯曲的脚爪，较扁，横切面形态和现代树栖鸟类相似，而不同于地栖类。其次，孔子鸟的脚趾节比例也更接近树栖鸟类，而明显不同于地栖鸟类。此外，它的前肢上依然保留有三个指爪，并且大而弯曲，而且前肢趾节的比例也表明，它可能具有辅助攀缘的功能。同时，现生鸟类普遍具有的两性异形最早也能追溯到孔子鸟——有件化石上完整地保存了两只不同形态的孔子鸟，其中一只具有典型的两条长尾羽毛，另一只则没有。

树栖起源的另一个证据，则藏在早期鸟类的骨骼中。现代鸟类从地面凌空而起的画面，相信你一定见过。但这个技能，早期的鸟类恐怕并不具备。这和它们的肌肉分布有关：在现代鸟类中，与起飞关系最密切的飞行肌肉上的乌喙肌主要附着在龙骨突和乌喙骨上。乌喙肌穿过一个

由肩胛骨、乌喙骨和叉骨组成的三骨孔，在飞行中负责提升翅膀，其活动机理如同一个滑轮。但孔子鸟的化石证据却显示，龙骨突只是初步发育。



由此可以证明，它们的相关肌肉还并不发达，或者说并不具备这样的“飞行滑轮”。可它们又分明已经具有可用于飞行的翅膀和飞羽，再结合它们善于爬树的特点，由此推测，它们或许只能从有一定高度的树上借助重力起飞，在树木之间飞来飞去，并不能远距离迁徙。这或许也是早期鸟类化石都具有一定“地域性”的原因。

不过，一个无可争辩的事实是：飞向蓝天的鸟类凭借着越来越优越的飞行工具，逐渐具备了与翼龙争锋的能力。而其中的一些，更是得以在白垩纪大灭绝中幸存下来，并且在新生代的天空里再次所向披靡，成为天空的绝对主宰。

特别鸣谢：东明先森，本文联合撰稿人

小知识点补充

多样的飞行方式

作为独立的一纲，现存的鸟类至少有9000多种，所表现出的物种

多样性依然是惊人的。单就飞行能力来说，不同的体形，也有各自的“飞法”：一般来说，小型鸟类以鼓翼和滑翔为主，大型鸟类多具有较好的翱翔能力。

鼓翼：依靠双翼快速、有力扇击而产生动量。这是鸟类飞行的基本方式，特别是在起飞时及在飞行中需要获得更大的升力与冲力时。

当沿水平路线飞行时，翅膀向前下方挥动以产生升力和推力；若推力超过阻力、升力等于重力时，便能保持直线向前的速度。鸟类在扬翅时不会产生推力，此时依靠的是前一次扇动翅膀时所产生的水平方向的动量而前冲。蜂鸟的鼓翼飞行又与众不同，它在扬翅时翼面呈“8”字形转动，翼的上表面转向后方击动空气从而获得推力，因此在扬翅及扇动翅膀时均能产生升力和推力，能够像直升机一样“悬停”在花前吸吮蜜汁，甚至还可以倒退。

滑翔：从某一高处向前下方的飘行。升力与阻力的比值越高、滑翔的速度越小时，下沉的速度也越慢，从而获得较远的水平滑翔距离。鸟类飞行时，在鼓翼获得足够的高度和推力之后，常伴以不同程度的滑翔。这也是着陆前的必要飞行方式。

翱翔：从气流中获得能量，而不需肌肉收缩获得动量的一种飞行方式。翱翔消耗的能量最少，那些翅膀宽大的鸟类以这种方式飞行，例如鹤、鹳和猛禽。这种方式与前文提及的巨型翼龙也十分类似，被认为是趋同演化的结果。

暗夜飞行者，成功的蝙蝠

飞天之路，到这里算是接近尾声了。而最后的这位主角，正是所有可以依靠动力飞行的生物中与我们亲缘关系最近的一支：翼手目（Chiroptera）哺乳动物，或者通俗点说，蝙蝠。

在很多人的印象里，蝙蝠似乎并不是什么好东西。小时候听过一个童话故事，大致说的是蝙蝠是个在鸟和兽之间的骑墙派，结果最终落得个被两边嫌弃的尴尬境地，只能在夜晚活动。西方文化中，更是把蝙蝠和吸血鬼联系在了一起[(24)]。再后来，有关蝙蝠传播狂犬病，亦是超多病毒的宿主等的研究出炉，加之的确长得有点狰狞的外貌，让许多人对蝙蝠并没有什么好感。不过，在我国的传统文化中，因为和“福”同音，而且它还喜欢倒挂，所以蝙蝠的图腾曾经一度非常受欢迎。

无论你喜欢还是不喜欢吧，蝙蝠这个物种的确非常奇特——在鸟类已经牢牢控制住天空之后，竟然依然能够从哺乳动物中演化出来，并且活得还不错。这背后，自然有它的独门秘籍。

成功的蝙蝠

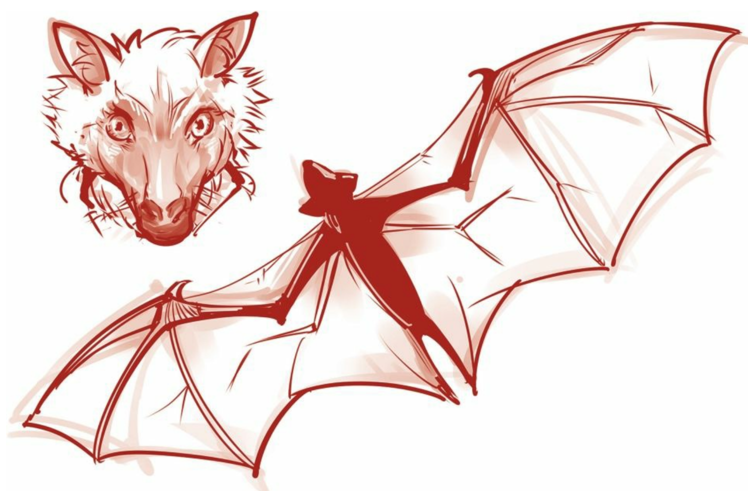
之所以说蝙蝠活得不错，是有论据的。虽然在提到哺乳动物的时候，绝大部分人肯定都不会首先想到它们。再加上特立独行的生活方式、普遍娇小的个头，人们总认为，它们在哺乳动物中是个不怎么起眼的小分支。但如果从动物学的角度来看，这种偏见就大错特错了。

可以说，蝙蝠可能是哺乳动物当中演化得最为成功的物种之一。蝙蝠所属的翼手目[(25)]，其实是哺乳动物中仅次于啮齿目动物的第二大类群，共有2亚目19科185属962种，并不断有新种被发现。而如今整个哺乳纲之下，也不过就5600多个种的动物而已，换句话说，这个地球上，差不多每5个种的哺乳动物中，就有一种是蝙蝠！现在，你还会觉得蝙蝠不起眼吗？

它们更是世界上分布最广的哺乳动物类群之一，除南极、北极及大洋中过于偏远的荒岛外，地球上的各种陆地生态环境，无论是高山、密林还是沙漠都能找到它们的身影。过去，习惯把在翼手目的物种分为大蝙蝠亚目和小蝙蝠亚目。顾名思义，前者总体个头较大，后者总体娇小。后来根据分子生物学的证据，这种分类方法已经废弃。取而代之的

则是阴翼手亚目（Yinpterochiroptera）和阳翼手亚目（Yangochiroptera）。

阴翼手亚目下的狐蝠科（Pteropodidae）的一些物种，经常被一些营销号报道为东南亚密林中发现某恐怖未知生物。这种说法也情有可原，个头最大的大狐蝠（P.vampyrus），平均体长在20～25厘米，最大的个体则超过40厘米。更加震撼的则是它们的翼展，平均在1.2～1.5米。最大的亚种马来大狐蝠的翼展更是超过1.8米。别看样子可怕，但狐蝠其实吃得非常清淡，虽然体形偏大，但却以水果为食，因此也有“果蝠”的别称。而且，不同种类的狐蝠间体形差异也很大，最小的狐蝠，体长只有约5厘米，重约15克[26]。



大狐蝠

夜空的王者

不过问题也就随之而来：作为飞行界的后来者，作为哺乳动物的蝙蝠，又是如何在鸟类统治的天空下，寻找到自己一席之地的呢？这其实归功于鸟类在生态位版图中的一个弱势领域——夜行性。

我猜一定有人想说，胡说啊，不是有猫头鹰、夜鹰什么的吗？没错，它们的确擅长夜行，但绝大多数的鸟却都不具备这样的能力。原因

主要和视网膜上的感光细胞有关，对于大部分鸟类来说，它们眼中的用于在明亮环境下辨别色彩的视锥细胞非常发达[27]，但用于在暗夜环境中感受弱光的杆状细胞却很少，一到晚上基本就是睁眼瞎。

至于原因，或许是它们觉得，凭着它们的身手，在白天光明正大地吃饭已经足够了。而这，恰恰就给了“暗夜飞行者”蝙蝠绝好的发展空间。某种程度上，鸟类统治的是白天的天空，而蝙蝠则普遍掌管着夜晚的天空，两者算是井水不犯河水。

至于为何蝙蝠可以抓住这样的机会，似乎又可以回到那些被恐龙压迫得只能在角落里偷生的我们的哺乳动物祖先那儿了——要么钻在洞里，要么躲在树上，又或者习惯于夜晚行动。树栖与夜行，似乎又是蝙蝠演化的关键因素（详见第三章第3节）。

额外说一句，很多人认为蝙蝠是瞎的，其实这并不严谨。具体还是得看物种，比如狐蝠，就拥有强大的视觉中枢，它们在清晨和黄昏最为活跃，并非严格的夜行者。而且，只有少数狐蝠科成员拥有声波定位的能力。至于以昆虫为食的夜行蝙蝠，虽然普遍眼睛小、视力差，并不代表没有视力。甚至，一些种类在色彩的感知力和可见光的感知范围上，还要优于人类。

独特的飞行装备

蝙蝠的飞行装备又如何呢？可以说，某些地方像翼龙，某些地方像鸟。说像翼龙，自然指的是类似于翼龙翼膜的皮质翼膜。而且，这张膜不仅仅是前肢连到后腿，在后肢和尾部之间、颈部和前肢之间同样都有膜，这和翼龙很像。不过，与翼龙不同的是，蝙蝠的翼膜是由其第Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ指之间延伸而出，并连接至后肢形成的，而翼龙我们说过，是延长了第Ⅳ指成为翅膀架子。所以，画画的时候注意了，画翼龙的时候，翅膀面上是没有骨骼的，而蝙蝠则有条骨架。

说蝙蝠像鸟，则是由于发达的胸骨进化出了类似鸟类的龙骨突，利于胸肌着生，因此蝙蝠可以像鸟类那样鼓翼飞行！这一点非常独特，虽然哺乳动物中还有许多同样有翼膜的生物，比如鼯猴、鼯鼠、飞袋鼠等，分布于不同的目下，最早的版本甚至在1.6亿年前，但这些生物都只能滑翔，并不具备鼓翼，也就是真正意义上飞行的能力（详见第三章第3节）。

至于蝙蝠飞行的动力学原理，它们与鸟类其实还有些不同。从空气动力学的角度来看，鸟类在飞行时两翼后侧分别产生的空气涡流会发生合并，形成单一的气流环，这样能够尽可能地减少飞行中产生的扰动和身体后方的拉力。而蝙蝠的飞行机制并非如此，蝙蝠膜状翼后方产生的涡流不会合并，两翼基本保持独立运行。尽管这样会减低空气动力作用的效率，但会给蝙蝠带来其他的好处：快速转弯的能力。

同时，在飞行速度较低时，蝙蝠翅膀向上扇动的过程中会产生很大的力。这种力对鸟来说不是好事，这从鸟类将翅端羽毛分开来刻意避免这一状况就可以看出，但这种力对蝙蝠却有特殊的意义。蝙蝠翅膀向下扇回时能够产生较大的升力，这一飞行方式很像大黄蜂。

蝙蝠两翼会在扇动过程中产生弯曲，这就好比航海时水手利用风帆向预定的方向前进。另外，与鸟不同的是，蝙蝠无法从地面上直接起飞，必须在较高的位置，先利用重力产生的速度，然后在空中滑翔。是不是让你想起了早期鸟类的起飞方式？

此外，蝙蝠还有独门装备：蝙蝠的翼膜上覆盖着微小的毛发。起初，科学家一度认为，这些毛发是蝙蝠在黑暗中飞行时用来感知周围环境的。但在蝙蝠的回声定位技能被发现后，这种观点就被抛弃了。不过，这些毛发依然在蝙蝠的飞行控制中起到至关重要的作用。蝙蝠能够利用它们感知到掠过翼膜空气的速度与方向。这样的信息或许可以帮助它们及时调整空中的姿态。

蝙蝠的起源之谜

至于蝙蝠究竟是如何起源的，很遗憾，直到如今，这都是一个未解之谜。达尔文曾在《物种起源》中感叹：从不能飞的原始哺乳动物演化为能飞的蝙蝠是不可思议的。

跟任何一种可以飞行的生物一样，蝙蝠飞行能力的演化同样需要一系列十分复杂的形态和生理变化。最早的翼手目化石发现在中始新世，大约是五千万年前，骨架保存得非常完好。可令人感到不解的是，根据分析，此时的它们就已经完全适应了飞行，并且具有有回声定位功能的耳朵。换句话说，这一时期的蝙蝠和现今的蝙蝠已无太大差异。更加让人困惑的是，目前为止，我们也并未发现介于蝙蝠和无飞翔能力的始祖动物间的化石标本。难怪有人说，蝙蝠就好像是突然以这种样貌出现在了五千万年前似的。

针对这种情况解释很多，这里介绍一个我觉得比较有意思的版本。这一学说的突破点在于“蝙蝠前爪为何变得如此修长”。

研究者比较了小鼠和蝙蝠前爪的胚胎发育情况，这两种动物的前爪都发育于软骨细胞，这些细胞逐渐分化、成熟形成骨区，称为生长盘。但蝙蝠的生长盘有个关键的区域称为增生带，比在小鼠中的长，这就使得它们的前爪可以长得更长。这点差异由一个单一基因BMP2控制，BMP2也是哺乳动物四肢生长的重要基因家族之一。

进一步的研究发现，在蝙蝠的增生带出现了BMP2生成的蛋白，小鼠中则没有。而当研究者把这些蛋白注入胚胎期小鼠的前爪后，这些小鼠的前爪便会像蝙蝠般继续成长。于是，科学家得出了这样一种猜测：是基因的突变，让蝙蝠的祖先在很短的时间内演化出了长长的前爪。

这样一来，前面提到的蝙蝠的“突然出现”似乎就能说通了。基于这种假设，蝙蝠祖先学会飞行的过程大概是这样的：首先，这些蝙蝠祖先

像现在的鼯鼠一样爬到树的高处，然后一跃而下，它们伸展四肢，让皮膜像滑翔翼一样载着它们从一棵树滑翔到另一棵树，并且不断地发生着适应性的变化，或者说积累着突变。

终于有一天，它们的手指演化到了一个非常修长的地步，指间的皮膜和身体皮膜连在一起，有了“翅膀”的样子。同时，因为手指也成了翼的一部分，再辅以日渐发达的肌肉群，它们对皮膜翅膀的驾驭能力也达到了一个空前的高度，最终让它们发展出了扑翼飞行。随着骨骼结构的进一步优化，胸大肌的进一步发达，它们向前下方挥动翅膀产生的升力和推力逐渐超过自身重力，这样一来它们就可以飞到更高、更远的地方了。

仅从逻辑上看，似乎没啥毛病。不过，蝙蝠飞行的原动力是什么，或者说是怎样的环境让它们做出了这样的选择？在真正的过渡类型化石被发现之前，恐怕也没有谁敢给出一个确定的答案了。

小知识点补充

回声定位与声呐

估计从幼儿园开始，你就知道：蝙蝠出色的夜间飞行能力仰赖于它们了得的回声定位系统。但这里也更正一个误区，很多少儿科普文都说：人类受到了蝙蝠的启发发明了雷达。但事实上，蝙蝠的这套基于声波的定位系统，对应的技术应该叫声呐，与借助电磁波运行的雷达有本质的不同。

其实声呐也不是受到蝙蝠的启发，早在1906年，声呐就在英国海军中广泛应用，在二十世纪二三十年代，雷达也基本成形并投入军事领域中。对于蝙蝠回声定位的能力，却是在1944年由动物学家格里芬进行实验确定的。所以说，这两项技术和蝙蝠都没啥关系。历史上，

蝙蝠回声定位的发现还得感谢以上两项技术的出现，因为格里芬正是在得知高频声探测仪的发明后灵光一闪，才最终揭开了蝙蝠回声定位的秘密。

---

(1) 头虾纲（Cephalocarida）和桨足纲（Remipedia）是现存的和昆虫所属六足类亲缘关系最近的节肢动物。我们或许可以从它们身上一窥昆虫祖先早期的面 貌。

(2) 最早疑似有翅昆虫的化石发现于早泥盆世地层，距今约4亿年。2014年，“千种昆虫转录组进化”研究联盟使用基因测序技术推断昆虫获得飞行能力的时间接近，而现生昆虫的共同最近祖先甚至可追溯至4.8亿年前的早奥陶世。

(3) 这些昆虫不完全变态或变态不显著，很少有蛹期，比如蟑螂、白蚁、竹节虫等。

(4) 现生的襀翅目昆虫（石蝇），被认为是新翅类中最原始的类群，生活在水中，翅无法用于飞行，而是当作帆来使用。

(5) 古翅类（包括蜉蝣及蜻蜓等）的翅在背上不能折叠，是保留有较多原始特征的有翅类群；新翅类（除蜉蝣目、蜻蜓目以外的全部现存有翅昆虫）的翅能折叠，静止时覆盖在背面。

(6) 严格来说，其实如今也是如此。昆虫是世界上最繁盛的动物类群，已发现超过100万种。相比之下，已知的哺乳动物不到6000种。

(7) 石炭纪巨大体形昆虫产生的原因存在争议，大气含氧量只是其中一种可能的原因。缺乏空中掠食者也是可能的原因，巨脉蜻蜓所属的魁翅目与植食性古网翅目之间或许出现了“巨大化”的装备竞赛。此外，由于蜻蜓的幼年期生活在水中，巨大的体形可能只是为了更好适应当时水中的高氧环境。

(8) 搜索前请做好心理准备。

(9) 这里并非意味着所有的昆虫都会增大三倍，它们的个头依然是有大有小，和几亿年前一样，只是最大个体的极限被鸟类压制了。

(10) 目前并无标准中文译名，此名为笔者直译。此外，卡尼期洪积事件可能还使得一些原本整个生命周期都已在陆地的昆虫，重新发展出了水生阶段的幼虫期，可算是另一个版本的“重返水中”。

(11) 通常而言，同一种类的蚊子，雄蚊的振翅频率比雌蚊更高。有记录的最高振翅频率出自摇蚊科（Chironomidae），约1000次／秒。

(12) 最早的翼龙化石发现于1784年，甚至一度被认为是一种海洋动物，它们长长的前肢骨骼被认为充当了桨的功能。

(13) 第IV指对应我们的无名指，第V指对应小指，以此类推。

(14) 目前无法得知这种独特纤维是否由角质、肌肉或者是具弹性物质所构成，因此也无法得

知其实际功能。研究人员推测，这种纤维可能有使翼膜坚韧、加强的作 用。

(15) 翼龙类的毛不同于哺乳类的毛发，而是独特的结构，两者是趋同演化的后果。有古生物学家甚至为翼龙类的毛建立了一个专有名词，“Pycnofibre”，意为密集的丝状物。

(16) 如果现在还能吃到翼龙大餐的话，前肢或许会比后肢更加受到欢迎。

(17) 它们成年个体的翼展可以达到3.5米，但幼年个体的仅十几厘米，翼龙蛋化石的长轴则在6厘米左右，呈椭圆形。

(18) 古生物学家如今普遍将始祖鸟看作一种小型的兽脚类恐龙。而且，根据化石分析，它也并非鸟类的祖先，反倒很有可能是后期恐爪龙（Deinonychosauria）的祖先。

(19) 目前已知三种始祖鸟，分别为印石板始祖鸟（A.lithographica）、西门子始祖鸟（A.siemensii），以及2018年确定的艾氏始祖鸟（A.albersdoerferi）。

(20) 原始祖鸟体形有火鸡大小，是一种生活在中晚侏罗世的小型兽脚类恐龙，在尾部保存了完好羽毛痕迹，据估计有较低的飞行能力，但相较于始祖鸟更加原始一些，所以被称为原始祖鸟。

(21) 此后发现的化石的确证实了这一观点。

(22) 类似如今的孔雀。

(23) 确切生活年代存在争议，化石所在的地层同位素年龄约为1.24亿年。

(24) 真正的吸血蝙蝠仅仅有三种，且都生活在中南美。

(25) 此目下的物种我们都可以叫蝙蝠，都会飞。

(26) 除了狐蝠科，阴翼手亚目下还有5个本属于原小蝙蝠亚目的科，即凹脸蝠科、鼠尾蝠科、菊头蝠科、叶鼻蝠科与假吸血蝠科。后来发现，它们其实与狐蝠的亲缘关系更近，被归入菊头蝠总科，与狐蝠科所在的狐蝠总科并列，而狐蝠总科下仅有狐蝠科一科。

(27) 鸟类的色觉比人类发达多了，具有四种类型的视锥细胞，可以看见“紫外色”。

第六章　最终的王者：人类兴起

来，先给“人”一个定义

相信阅读本书的各位，应该和我一样，都属于人吧。无意冒犯，你有没有想过，什么样的动物才算人呢？或者说，有一天来了个外星人，我们该如何向他介绍，才能把我们这个物种同这颗星球上的其他物种区别开来呢？

从生物分类学的角度来说，我们属于灵长目（Primates）人科（Hominidae）人属（Homo）智人（Homo sapiens）这一物种。在人科这一层级，有如今生活在东南亚的猩猩亚科猩猩属的猩猩[(1)]；而在人亚科下则有大猩猩属和黑猩猩属。至于人属的动物，很不幸，仅一种现存，就是我们智人。

所以，从“科”的层面来看，以上这些猩猩也都是“人”。当然，从人类中心主义的观点出发，你或许更愿意称它们为“猿”。接下来，我们不妨从动物学的角度再来审视一下“智人”。

小知识点补充

这是一种杂食、群居的陆地两足动物，拥有一系列与双足行相适应的骨骼和肌肉，包括失去抓握能力的脚部结构。这一物种减少了身体大部分的毛发覆盖。雌雄异体，在体型上表现出中等程度的性二态性，体内受精，胎生，妊娠期平均为40周，能够全年繁殖。

智人为单一物种，并无现存亚种，物种内部不存在生殖隔离。相

较于其他猿类，智人拥有显著增大的大脑，并且能够借助复杂的语言进行沟通、交流等活动；能够使用并控制火，以及加工并且使用各种复杂的工具。

该种群分布广泛，适应性强，目前日益增加，并且没有导致总体数量下降的主要威胁。在世界自然保护联盟（IUCN）2008年《濒危物种红色名录》中，智人被列入“无危”一级。

熟悉演化逻辑的朋友肯定也都知道，演化并没有明确的方向，所有的一切都只是对于当前生存或生殖环境的适应。一个物种从兴起到繁盛，所走过的路也必然不是一帆风顺的。究竟是什么让智人这样脱颖而出，最终成为“万物之灵”的呢？接下来，就和大家聊聊我们这个物种的兴起之路。

地猿

1亿年前，鼠与人类的共同祖先出现；8500万年前到6500万年前，一类娇小、夜行、树栖、以昆虫为食的动物出现了，它们的后代就包括了我们灵长目。由于恐龙占据了各种“高大上”的生态位，所以留给我们祖先的位置基本上都是些它们看不上的，比如地下或树上，而且基本还只能在晚上偷偷摸摸活动（详见第三章第5节）。而我们的祖先，就是在树上活动的那一拨。

做父母的应该有过这样的经验——刚出生不久的小宝宝，如果我们把手指放在他们的掌心或者脚趾下，他们的手指或脚趾会本能地弯曲、抓握，而且力气还不小。这其实就是我们身上保留着的“树居物种”的影子。这就是新生儿“握持反射”——抓握的力量之大，足以承受婴儿的体重，甚至可以借此把他们提起来几秒钟。这种反射在第1个月增强，随后逐渐减弱，3~4个月时消失。借助这种本能，小宝宝就能抓住妈妈或者树枝，确保自己能活下来。

接下来的时间线大致是这样的：

大约4000万年前，灵长目下分化出了类似狐猴、眼镜猴这样的原猴亚目（Strepsirrhini），以及类似猴子和猿这样的简鼻亚目（Haplorrhini）；

大约3000万年前，简鼻亚目又分成了阔鼻小目（Platyrrhini）和狭鼻小目（Catarrhini）[(2)]；

大约2500万年前，狭鼻小目分化为猴总科（Cercopithecidae）和人猿总科（Hominoidea）；

大约1500万年前，人科（Hominidae）从长臂猿科（Hylobatidae）的共同祖先中分离出来；

1400万年前～1300万年前，人亚科（Homininae）从猩猩亚科（Ponginae）的共同祖先中分离出来；

大约1000万年前，人族（Hominini）从大猩猩族（Gorillini）的共同祖先中分离出来；

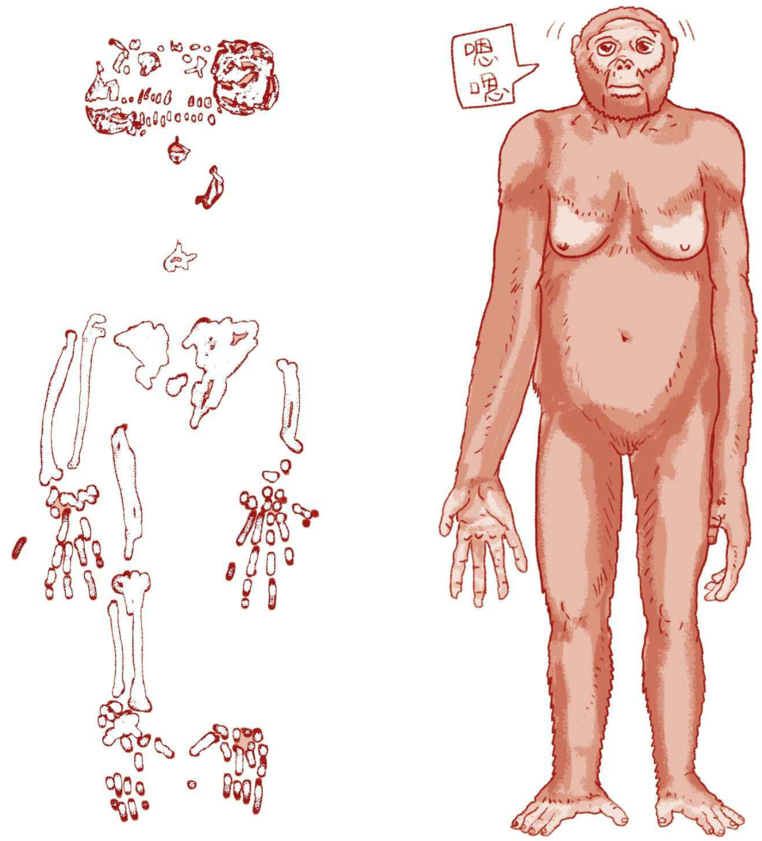
700万年前～600万年前，人亚族（Hominina）从黑猩猩亚族（Panina）的共同祖先中分离出来。

大致可以理解为：我们和黑猩猩在差不多600万年前是一家。解剖学表明，人与黑猩猩的共同特征是在出生的前两年喉头会易位到咽头与肺之间的位置，这说明两者的共同祖先也拥有这一特征。

你或许会觉得，与黑猩猩分道扬镳之后，最早的“人”就出现了。这样的说法，对又不全对。大约500万年前，一种叫地猿（Ardipithecus）的生物出现了，它们生活在埃塞俄比亚。现在我们认为，它们或许是我们的直系先祖，但别以为它们要比黑猩猩的祖先那一支厉害。

起码，如果仅仅从脑容量的角度来看，还真看不出什么差距来——

地猿的脑容量只有300～350毫升，而这个数据其实和现代的倭黑猩猩以及雌性黑猩猩相当，和现代人类进行比较的话，基本上只有我们的1/5左右[3]。



地猿

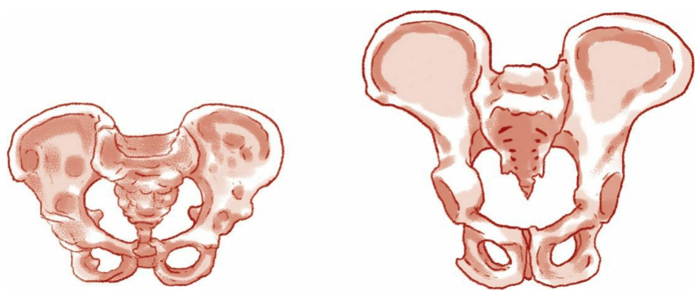
感觉它们和黑猩猩近亲也没什么区别，是不是？其实区别还是有的，首先，它们没有黑猩猩那样尖利的獠牙；其次，将它们与黑猩猩祖先区分开来的，其实还是行走方式。如果大家在动物园看过黑猩猩的话，也许会注意到，大部分时候，黑猩猩会用指关节拄地，依靠四肢来行走。但地猿却是用手掌来行走——这和我们爬行时的手部动作很像。当然地猿的手可比我们长多了，所以爬的时候膝盖是不用接触地面的。

从解剖特征来看，它们依然是树栖为主的动物。这也意味着它们或许需要和黑猩猩的祖先在森林中争夺食物。而这两方，到底谁技高一筹还真不太好说。至于为什么还管它们叫“地猿”，关键之处还是在于，它

们已经具备了直立行走的能力——通过对骨骼结构的分析可知，地猿既能像黑猩猩那样爬树，也能类似于我们这样直立行走。

可鱼与熊掌不可兼得的道理大家都懂，所以爬树和走路这两件事儿，它们似乎又做得都不够出色：为了迁就走路，它们的脚趾已经没有黑猩猩那般灵巧；又因为是平足的关系，科学家估计它们也不擅长长时间行走。更多时候，或许还是四肢并用。

说起来，黑猩猩有时候不也会两足行走吗？不过和地猿相比，两者还是有差别的。先回忆一下黑猩猩两足行走时的步态，是不是左右摇晃得很明显？而且膝盖似乎总伸不直？换句话说，我们人类的步态会比黑猩猩来得更加稳定，这其中的一个主要原因，就是我们的骨盆形状和它们不一样。



人类骨盆（左）和猩猩骨盆（右）

包括黑猩猩在内的其他大猿，它们的骨盆[(4)]要比我们的高很多，而且朝向后方，而我们的则是朝向侧方。这可是一个关键的变化——这样一来，在行走时只有一条腿做支撑的情况下，髋部侧面的臀小肌也能使上半身保持稳定。而黑猩猩则无法做出这个动作——因为它们的髋部面向后方，于是同样的肌肉只会把它们的腿往后拉伸。当黑猩猩的一条腿着地时，它们只有把躯干向这条腿倾斜，才能避免向侧方跌倒。

因此，对于古人类或古生物学家而言，骨盆算是一个区分人和猿的重要线索。虽然关于地猿的骨骼遗存相当有限，但经过计算机重建模型之后的结果显示，它们的骨盆与我们更加接近，也就是说，它们在两足

行走时会比现代黑猩猩更加稳定。

读到这儿，你有没有和我类似的感觉：地猿的行动方式虽然更接近我们，但在当时看，似乎也并没有比黑猩猩有更多的优势，总该有什么好处，才会使它们演化成这样吧？

当然，确定的答案肯定是给不了，科学家也只能够靠推测。有一个说法是：这种方式可以使得地猿在直立行走时携带更多的东西。话说回来，我们一直说，演化很多时候没有什么明确的方向，一些随机的变异，如果没有什么致命的影响，其实也无伤大雅。只有当环境发生改变时，一些更有利于生存繁衍的特质才会大放异彩。

关于地猿和人类、黑猩猩之间的关系，本身还存在着不少争议。在写这一篇的时候，我也非常纠结。和所有起源的问题一样，都是一个又一个非常复杂的拼图游戏。可是很遗憾，我们能找到的拼图又只有可怜的那么一丁点儿。曾经看到过一个说法：地猿有可能是黑猩猩与人类的共同祖先，甚至还不是最后的共同祖先。

即使地猿已经出现更适应直立行走的特征了，可第二个版本，逻辑上也没问题。在分家之后，黑猩猩那一支可能再次向着更适应树栖生活的方向进行了演化，也就是重新点满了“爬树的技能点”；而人类这一支则在直立行走的道路上一路狂奔。甚至，在刚分家的那段时间，人类的祖先和黑猩猩的祖先，还进行过基因交流，也就是杂交。

南方古猿

接下来的这段故事，我们会先从1924年的南非说起。那一年，热爱研究化石的澳大利亚解剖学家雷蒙德·阿瑟·达特（Raymond Arthur Dart）收到了两箱化石，其中一块与众不同的幼年个体头骨化石引起了他的注意。他很快意识到，这很可能是一个伟大的发现。

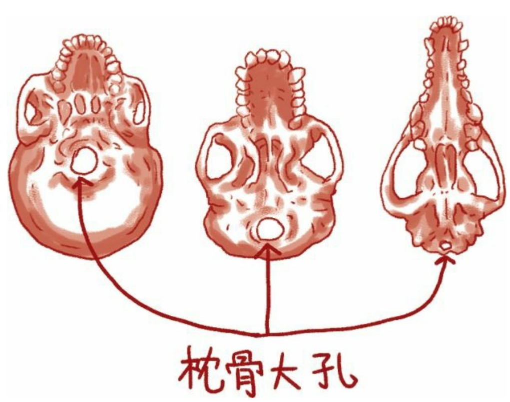
为什么说它与众不同？再回忆一下你印象中的黑猩猩，它们两足站

立或者行走的时候，是不是觉得背有点驼、头有点向前倾？问题主要就出在脖子上，或者说，身体和头颅的连接方式上。

想一想，我们的头和身体为什么能连接在一起，关键是靠脊柱的支撑。而脊柱和颅骨又是如何连接，并且能够让大脑的指令经由这里畅达全身各处的呢？我们俗称的后脑勺，这块骨头叫作“枕骨”，在它与脖子相连的地方，有一个非常明显的大孔，叫枕骨大孔，脊髓就是通过这里进入脊柱的。

有了这个基础，我们再来看达特的发现——这枚来自200多万年前的小小的脑袋，乍一看和猿类很相似，嘴巴也是向前突出的。但也有些不同，比如它的牙齿比较平整，而更令人惊喜的是，它枕骨大孔的位置已经接近头骨底部中央！

对于我们现代人来讲，这个孔当然应该在中央；可对于四足行走的猿来说，这可太奇怪了——它们的枕骨大孔位于颅底相对靠后的地方。而我们因为是两足行走，得把头平衡在脊柱的正上方，因此，枕骨大孔处于颅底中央就成了最佳的连接方式。也就是说，和骨盆的结构一样，这也是一个直立行走的重要证据。



现代人的头骨（左）、黑猩猩的头骨（中）、狼的头骨（右）的枕骨大孔

由于化石的发现地点是在南非的塔翁，所以达特先生就将其命名为“塔翁男孩”，他还认为，塔翁男孩属于人类。但在当时，大部分人其实并不承认自己的祖先是古猿，而且，由于种族歧视，人们更不愿意承

认人类发源于非洲这片土地。所以，塔翁男孩到底是人还是猿也就被搁置了。再后来，科学家又陆陆续续在南非找到了许多属于类似物种的化石标本，而且经过研究分析发现，它们都具备直立行走的特点。这类独特的猿，被称为“南方古猿（Australopithecus）”。

后来，科学家在撒哈拉以南非洲的更多地方都发现了类似的化石，尤其是东非。而且，南方古猿中最著名也是最关键的一个个体标本，就是在埃塞俄比亚的阿法盆地出土的：1974年，约翰逊等人组成的考察队出土了一具“异常完整”的雌性南方古猿化石，她身上40%的骨头都还连在一起。要知道，此前人们发掘出来的同时期骨化石都相对不完整或者破损严重。

要知道，之前光是找到块骨盆或者是颅骨的碎片都是不得了的事儿了。一下子找到40%的骨头，还都连在一起，对于古人类学家而言，这意味着什么自不用说。回到营地后，他们一边放着披头士乐队的《天上戴着宝石的露西》（*Lucy in the Sky with Diamonds*），一边狂欢庆祝。也就是因为这首歌，他们将这具南方古猿命名为“露西（Lucy）”。

露西经常被说成是“全人类的外祖母”。其实，这只是一种形象的比喻，为的是强调，她所属的这个物种在演化树上与我们现代人的直系或有极为接近的关系。当然，我们身上是否流着露西的血脉，这一点已经无从知晓。

像露西这样完整的化石的出土，无疑给了科学家一个绝佳的机会去研究南方古猿生前的样子。在研究完她的骨头，尤其是她的膝盖结构和脊柱弯曲之后，科学家发现露西不仅能直立行走，而且它大部分时间都是像我们这样，靠两条腿走路的！根据发现的脚印证据显示，它们的行走速度为每秒1米或1米以上，已经与我们平时走路的速度相近了。考虑到南方古猿的身高是1.2～1.4米，甚至可以说这种速度还挺不错的。

在露西的发现地附近，科学家又陆陆续续找到了更多与她同属一个物种的化石，而这一物种被命名为“阿法南方古猿”。根据分析，它们生

活的时间大约是350万年前。随着研究的深入，它们是我们人类直系先祖的观点，也越来越成为一种共识。

既然如此，那为什么不叫它们“南方古人”而称为“猿”呢？毫无疑问的是，比起更早的祖先，它们具备了许多更像“人”的地方，比如脑容量稍微大了些，为380～430毫升，但依然没有和黑猩猩拉开明显的差距；它们的身高只有1.2～1.4米；且手、脚及肩膀关节的结构又说明它们依然比较擅长爬树。也就是说，我们虽可明确，它们“介于人与猿之间”，但其实还是更接近于“猿”那边。

直立行走的起源

那么，相比起前面说到的地猿，南方古猿这种经常性直立行走给它们带来了怎样的好处呢？记得我们以前也说过，下地这件事，对于千百万年来都生活在树上的猿来说，更多的时候属于无奈之举。也许是气候变化引起栖息地环境变化，森林衰退，原来可以安居的树大量减少，一些地猿开始被迫长期在草原这样地面开阔的地带生活——它们失去了尖锐的牙齿和锐利的爪子，两足行走又使它们跑动起来也真说不上快，所以经常成为其他猛兽的美食。

估计你该说了：这哪里是好处呀，简直是自己给自己找不痛快呀。怎么感觉南方古猿混得一无是处呢？面对这样的环境压力，以及如此不占优势的身体构造，要延续生命几乎是无牌可打。这时候团结就是力量以及头脑好的重要性就体现出来了。

科学家曾经在一处地点发掘出了有男有女、有老有少，多达十几具南方古猿的骨骼碎片，这背后可能意味着一个悲伤的故事：因为某种自然灾害，比如泥石流或者山洪暴发，正在一起活动的一个家族可能来不及反应，瞬间被吞没——这场悲剧也成了我们的祖先是集体生活的有力证据。发现它们的科学家，将它们称为“第一家族”。也不难推测：集体生活、共同寻找食物、共同防范其他猛禽野兽的攻击，可以很大程度地

提高种群的生存率。

可头脑好和群体生活，这些不一定非得直立行走才能实现啊？而且，就算是被迫下地生活的，四条腿走路说不定跑得还快些呢。其实，人为什么会直立行走，这本身也是一个悬而未决的大谜题，各种假说层出不穷：一种可能性是直立可以增加高度，有利于发现远处的食物或危险。但要达到这一目的，其实偶尔短时间地用后腿站立一会儿也就够了，而这种事情黑猩猩也能做到。

还有一种浪漫的观点则认为用后腿站立可以解放双臂。这样就能将双手主要用来改造环境、搞研究或者制造工具。所有这些活动又都有利于眼和脑的发育，于是，大脑得到了进化，我们才开始成为真正的人。可这套观点在逻辑上有问题，以当时祖先的智力水平来说，怎么可能未卜先知想那么远？事实上，在南方古猿开始直立行走以后，又过了差不多200万年，我们的祖先才具备了制造石器的能力，拥有了属于“人”的智力水平。还看到过一个说法，说是直立行走比四肢行走更节省能量，使得我们祖先能依靠更少的食物活下来。

抱孩子假说

每个观点都有自己的道理，也都有自己的问题。这里和大家说一个我觉得比较有创意，也相对比较有说服力的观点：直立行走，是为了抱孩子！这个观点是玛丽·利基提出的，而她与她的丈夫、儿子、儿媳等一起，被称为“古人类学研究第一家族”。她的观点是这样的：南方古猿身材较小，所以无法杀死较大的非洲食草动物，也没有聪明到去组织打猎队伍，因此它们极有可能是口味有点重的食腐动物——也就是说，它们会在大型食肉动物杀死的大型食草动物的尸体残骸上寻找食物。

可这样一来，照看孩子就成了一个大问题：想象一下，如果不把没有行动能力的宝宝带着走，那南方古猿就只能在住地附近等待被杀死的动物。这一等，可就不知道要等到什么时候了。而如果可以用前臂抱着

孩子，后肢支撑着身体急匆匆地奔跑，跟着成群的羚羊和斑马，时刻准备着在大型食肉动物美餐之后分享猎物，是不是就比守株待兔强不少了？

为了更好地适应这样的行动方式，我们的骨盆变短增宽，从而为臀部肌肉在直立行走中提供更好的杠杆作用；腿骨角度变为内向，从而使得脚步能够保持在身体中心；脊椎形成S形弯曲，提升人体重心位置，并为大脑提供有效缓冲。而下肢也越来越长，从而使得行走中的步伐越来越大。我们的脚也随之发生了改变——猿类的脚很长，能够用脚趾抓住树枝：相比之下，人的脚趾却很短，能够在步行中起到杠杆作用。

庞大的南方古猿家族

前面也说过，除了露西和“第一家族”外，科学家在非洲发现了大量的南方古猿化石。这些化石表明南方古猿都具有能直立行走的特点，当然彼此间也有许多差别，因此科学家又进一步将南方古猿分成了阿法种、湖畔种、纤细种、鲍氏种，而且最早的南方古猿和最晚的南方古猿，它们生活时间的跨度其实有200多万年。

这里还是要和大家强调：演化并非单线前进的，在这一路上的每一代祖先都可能分出很多枝杈来。而每一条枝杈又会向着更加适应自身所处环境的方向演化。因此，虽然我们可以较为明确地说，我们是南方古猿的后代，但这并不意味着所有的南方古猿都是我们的祖先；或者说，所有南方古猿的后代都是我们的祖先。

所以，南方古猿并非单一物种的概念，而是横跨数百万年，所有具备类似特征的古猿的统称。而关于这四个种之间是如何演化的，谁和谁之间存在祖先与后代之间的关系，谁又是我们的直接祖先，还存在着很多争论。2019年，《自然》杂志上还刊登了一个重要发现。该文章表示科研人员找到了一块关键颅骨，从而证明了湖畔种和阿法种之间是平行的亲戚关系，而非祖先和后代的关系。

那我们的祖先到底是来自哪一种南方古猿呢？同样的问题我也请教过一位古人类学博士。她的回答是，她也不敢给出明确的答案。只能说目前来看，我们应该是出自露西所属的阿法种这一脉。而且，当我们更近的祖先出现时，其他地方的南方古猿也并没有消失，一直生存到了大约150万年前。

需要强调一下的是，南方古猿还是猿——分类上它是人科南方古猿属（南猿属）。在它之后，除了分化出了人属外，还有傍人属（Paranthropus）[(5)]。

走出非洲，智人登场

至此，相信大家对人类区别于其他猿类的一个重要特征——直立行走的来龙去脉有了一个基本的了解。可直到目前，真正意义上的人类还没有登场。地猿也好，南方古猿也罢，我们只能说，它们极有可能是我们的祖先，但并不能说它们就是人类。就好比我们上古时代的祖先肯定是某种四条腿的鱼儿，但我们也不能说它们是人类一样。

对于许多处于过渡阶段的物种，关于它的定义总是比较模糊的。关于早期的人类，也有同样的问题。比如，我们的特征之一，是显著增大的脑容量，可增大到多少才算是显著增大呢？又比如，我们拥有灵巧的双手，可多灵巧才算是灵巧呢？还比如，我们能够制造并且使用精致的工具，可多精致才算是精致呢？

正因为如此，关于最早的人或者最早的人属动物出现的时间，因为定义的不同，就产生了很大的争议。而接下来故事的第一位主角，关于他是不是人，基本上已经有了定论。

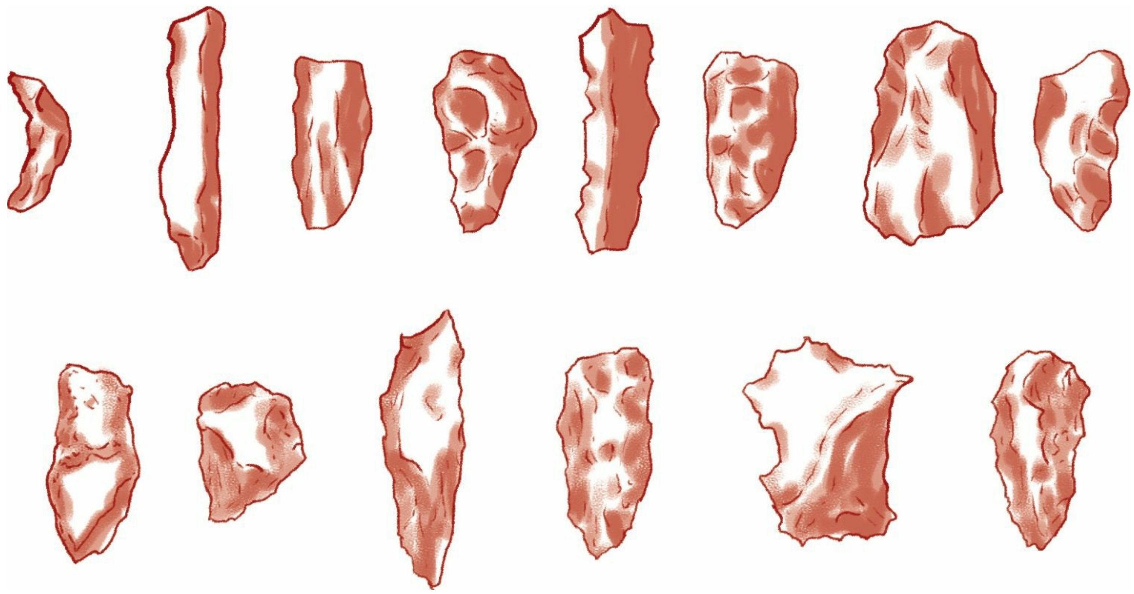
能人

1960年，科学家在坦桑尼亚的一处考古点发现了一些来自一个幼年个体的顶骨、下颌骨和手骨，以及来自成年个体的锁骨、手骨和足骨。根据推测，他们生活的时间大约是210万年前。此后，又陆陆续续有一些同属这一物种的骨头出土。科学家将他们称为能人（Homo habilis）。

顾名思义，他们很能干、心灵手巧。能人的主要特征是头骨纤细光滑，面部结构轻巧，下肢骨与现代人很相似，身高在1.40米左右。他们的平均脑容量已经提升到了640毫升[(6)]。相比南方古猿，脑容量翻了快一倍，算得上是“显著增大”了。

除了更大的脑容量，能人一个更加强悍的特征就是开始制作和使用粗糙的石器！这件事儿可了不得，虽然如今像是黑猩猩这样的人科动物也会将细长的树枝插入蚁穴用来取食蚂蚁，但从没见过能把石器打磨成这般模样的。这些石器包括可以割破兽皮的石片，带刃的砍砸器和可以敲碎骨骼的石锤，这些都属于屠宰工具。根据这些石器的遗存，科学家推测，能人已经可以捕食中等大小的猎物了。而石器的出现，也意味着人类的“旧石器时代”拉开了序幕。

能够制造工具和脑容量的扩大是人属的重要特征——因此，能人，某种程度上已经是“人”了。他们的拉丁学名是Homo habilis，在分类上，他们是已知最早的人属动物，或者叫人属的“人”。



能人所使用的石器

或许正是因为制造石器带来的强大适应力，能人兴起之后迅速扩散，根据化石证据推测，他们的足迹遍布当时的东非及南非。上一节提到的南方古猿的分布范围也差不多是东非和南非，而且最早的人属物种出现时，它们也并没有灭绝。所以可以想象，其他地方的南方古猿后裔遇到能人亲戚时的那种惊恐，但自然就是那么残酷，谁更厉害，谁的血脉就更有可能延续。

和南方古猿的情况类似，几十万年的时间，分布于各地的能人后裔也都开始适应起了各自所属的环境，渐渐产生了差异。历史总是惊人地相似，这里的细节就不和大家展开了，感兴趣的可以自行探索。

匠人

大约180万年前，其中一支能人的后裔演变成了匠人（Homo ergaster）。当然，和我们如今所说的“匠人精神”的“匠人”可不太一样。他们的学名源自希腊文的“工人”，这是因为在发现匠人的位置，同时发现了斧头、刀子这样的比能人所制作的更先进的工具。

当然，工具的先进与否，是一个很难量化的概念。而更有意思的

是，在附近还存在着烧焦的动物骨头以及类似篝火的痕迹。这一发现可了不得，虽然他们能否自主生火尚不得而知，但这些迹象已经非常明显地告诉我们他们开始使用火了。这一点，已经使得他们明显区别于动物了。而且，从身体比例来说，匠人已经与我们非常类似。根据骨骼结构的分析，匠人很可能是最早发出人类声音的人科物种，听感上已经不再类似于猩猩了。从各个角度来看，匠人的确是比能人更“人模人样”了。

接下来依然是老套路——和前辈一样，匠人也走上了四处扩散并且“取代更早的原住民”的老路。现在通常认为，180万～190万年前，匠人从能人的后裔中分离出来，并且在非洲扩散。在非洲，匠人这一物种保持了50万年的稳定和繁荣。在匠人中，有一些勇敢的先行者，他们在温暖舒适的非洲故乡待腻了。世界很大，他们决定出去看看。

撒哈拉“泵”

物种的扩散其实并没有什么目的可言，生活在非洲的匠人也根本不会意识到外面的世界更加精彩。走出非洲，完全属于机缘巧合或者被逼无奈。在狩猎采集时代，一片土地只能供养数量相当有限的人，或许是为了避免与同类产生冲突，又或者是为了寻找新的猎物，匠人也和先辈们一样，一点点、一代代地向外扩散。

你或许会疑惑：按照这个逻辑，为什么之前的南方古猿没有走出非洲呢？的确，目前并没有在非洲以外发现过南方古猿的踪迹。但更早之前，的确也有成功走出非洲的人科动物——比如如今生活在东南亚的红毛猩猩。但走出非洲这件事，其实并不容易，需要靠天时地利（详见第六章第5节）。

通常情况下，他们的扩散之路会卡在红海以西、撒哈拉沙漠以南的位置。因为无论是亚丁湾与红海交界的20多千米宽的曼德海峡，还是900多万平方公里的撒哈拉沙漠，对于习惯了草原与森林生活的人类先祖而言都是“天涯海角”“生命禁区”。那时候的人类既没有骆驼也没有

船，撒哈拉以南的非洲，对他们而言的确就相当于是个孤岛了。

好在，如果等待的时间以10万年作为单位进行计量，那机会总会出现的。曾经说过，过去的数百万年间，全球气候在寒冷与温暖中摆动了许多次——只要时间久，沧海也能变桑田、沙漠也能变绿洲。

当全球变冷、海平面下降时，原本20多千米宽的曼德海峡最窄处，就会变得只有几千米宽。一些人或许就会借助着浮木之类的东西侥幸渡过海峡。而气候变化，有时候也改变西风带，使得撒哈拉沙漠的一些地方在数千年、数万年的时间里变成一片绿洲。或许是沿着红海西岸，又或许是顺着尼罗河，人类先祖就有了一路北上的机会，最终经由西奈半岛进入欧亚大陆。

在匠人出现之后不久，就已经有一些匠人走出了非洲。比如在格鲁吉亚，就出土过生活在180万年前的格鲁吉亚人[(7)]。此后，又有更多的匠人走出了非洲，那些在非洲故土锻炼出来的诸如制造石器与使用火这样的生存技能帮着他们在欧亚大陆上一路披荆斩棘！

直立人

可以说，这些走出非洲的匠人的后代，过得相当不错——他们的平均脑容量进一步提升，达到了940毫升，身高也达到了1.6米左右，下肢结构与现代人类十分相似，大腿骨接近现代人，已经采用几乎与我们一样的直立行走方式。这一大类的人属物种，就是直立人（Homo erectus）。而这其中我们最熟悉的一类或许就是——北京人（Homo erectus pekinensis）。

当然，严格来说，北京人和如今的“北京人”除了都生活在北京外，其实并没有太大的亲缘。虽然北京人的化石的确出土于北京周口店，而且也是当之无愧的国宝，但以如今的主流人类学观点来看，他们和我们现代中国人其实真没什么关系。注意一下他们的学名，Homo是人属的

属名，erectus代表直立人这一物种。而我们则是智人，在分类上则是Homo sapiens，是同一属下的不同物种。

在中国的土地上，曾经广泛生存过各种直立人。大家叫得出名字的，还有比北京人更早出现的蓝田人，已经被许多观点认为是中国最早直立人的元谋人。从170万年前到20万年前，直立人，都是中国这片土地的绝对主宰。不仅仅是中国，当时的欧亚大陆也都是他们的天下。

如果不是一些后来者的搅局，这些走出非洲的先行者，靠着打打猎、吃吃同类，小日子也许就这样过下去了。这可不是段子，有据可考，由于过于血腥，大家自己去了解吧。当然，有一个事实还是需要强调，几十万年的时间真的非常漫长，无论是在非洲，还是亚洲或欧洲，因为所处环境的不同，匠人的后裔[8]都逐渐开始出现独立演化的趋势。其中有一支——海德堡人（Homo heidelbergensis），非常特别。

海德堡人

最早的海德堡人遗骨发现于德国的海德堡，但后来的更多证据表明这一类群曾经遍布欧洲、西亚和非洲。他们兴起与活跃的时间与大陆东边的北京人大致接近。但与东方的亲戚不同，他们拥有更大的脑容量，为1100～1400毫升，这个数据已经和现代人的1500毫升极为接近了。他们有很大的眉脊，相比早期的人类物种，他们有更大的脑壳和更平的脸。海德堡人是第一个在寒冷气候中生存的早期人类物种，而他们短而宽的身体很可能是对保存热量的适应，毕竟相比非洲，欧洲要冷不少。

艰苦的环境也磨炼出了他们更加强大的生存技能：他们的石器更加精良，掌握了控火的技术，也用上了木材，因此他们可能也是第一批可以猎杀大象、犀牛、马这样的大型动物的人类；而且他们还有了更加厉害的突破，他们可以用木头和石头搭建简易的屋棚；甚至，还出现了最早的丧葬——这说明，他们可能已经有了精神层面的追求。

关于海德堡人究竟是早期走出非洲的直立人的后裔，还是后来才走出非洲的，这一点尚存争议。也许是寒冷的欧洲迫使他们发展出了更强的环境适应技术，也可能是拥有众多人科竞争者的非洲逼着当地人变得更强大。但可以肯定的是，足迹遍布欧亚非的海德堡人，是当时人属物种的佼佼者。似乎历史又要重演了——这般强大的存在，一旦扩散开来，对于其他的原住民又是灭顶之灾了。不过好在，欧亚大陆足够宽广，在当时还暂时容得下其他的直立人。

现在通常认为，因为气候和地理隔绝等因素，海德堡人逐渐分成了欧洲海德堡人和非洲海德堡人[9]。

尼安德特人

再后来，留在欧洲的那些适应了寒冷气候的海德堡人演化成了一个大名鼎鼎的物种：尼安德特人（Homo neanderthalensis）。

这个物种不仅有名，而且也足够优秀——他们身体强壮、肌肉发达，脑容量更是达到了1200～1750毫升，最大的比现代人还要大一些；他们使用石制的长矛、砍刀以及木棒，成了欧洲的顶级掠食者。而当时活跃于欧洲的洞熊、洞狮[10]这样的大型食肉猛兽，在面对尼安德特人的时候也只能敬而远之。

在没有被冰川覆盖的冰河时代的欧洲，几乎遍布着他们的痕迹。甚至有一些，向东一直迁徙到了中亚。某种程度上，有那么十多万年的时间吧，他们或许是这个世界上最成功的一群“人”，也被称为“早期智人（Archaic Homo sapiens）”。

大家也不要忘了，这时候，距离人类最早走出非洲的时间已经过去了一百多万年。除了尼安德特人外，这个世界上依然还有别的“人”存在。这其中，既有匠人的后裔、后来的直立人的后裔，也有非洲海德堡人的后裔，甚至还有与尼安德特人亲近的欧洲海德堡人的其他后裔，而

且，他们也都在适应着各自的环境，默默演化着。

比如在亚洲，就生活着丹尼索瓦人[(11)]，他们可能是尼安德特人的近亲，在进入东亚后或许取代了北京人的位置；在印度尼西亚的一个小岛上甚至还生活着可能是匠人后裔的弗洛勒斯人（Homo floresiensis），这是一种身高只有1米的小矮人；而在人类的大本营非洲，还有一个族群正在蓄势待发——那就是智人。

智人

我们的嫡系祖先，终于登场了。

目前发现最早的智人遗骨出土于埃塞俄比亚，面部特征介于现代人与尼安德特人之间。最突出的特点莫过于大而饱满的额头、更加扁平的面庞以及更小的下巴。到了16万年前，已经有证据表明生活在那里的长者智人（Homo sapiens idaltu）[(12)]有了丧葬仪式，也学会了宰杀河马。这的确很了不得，但这时候的尼安德特人，其实也同样了不得。

2019年，《自然》杂志上有篇文章指出，在希腊的伯罗奔尼撒半岛出土的一些头骨碎片，可能也属于智人。他们生活的年代甚至可以追溯到21万年前。如果这个发现最终得以证实的话，智人走出非洲的历史可能又会被改写。当然，有一点可以肯定：就在智人在非洲兴起后不久，他们中的一部分也同样步着前人的后尘，开始尝试走出非洲。但在最初，由于受到尼安德特人压制，他们的扩散之路并不顺利。毕竟，对手也是旗鼓相当，而且人家还有地理优势，毕竟欧洲这块地盘人家已经占了那么久，比智人更适应。

好在，智人等得起。经过十多万年的卧薪尝胆后，根据考古证据，大约在5万年前，智人向尼安德特人的领地发起了大规模的进发。这一过程大约持续了1万多年。这1万多年间，两个人种之间到底发生了什么，我们不得而知，但有两点可以明确：第一，最后一个生物学意义上

的尼安德特人消失于大约3万年前；第二，根据前些年对尼安德特人的全基因组测序的结果可以得知，除了非洲黑人外，如今的现代人体内大约残存着1%～4%的尼安德特人基因。

有没有可能出现过跨种族的爱情不好说，但从生物层面来看，考虑到两个人种分家的时间不过几十万年，生殖隔离还并不明显。而这样真正跨人种的结合，产生的后代完全有活下去甚至继续繁衍的可能[(13)]。

还记得上一节提到过的，我们的祖先和黑猩猩祖先的故事吗？类似的故事，其实在演化史上发生过无数次。类似地，在大陆的另一边，在东南亚及东亚的现代人群中，甚至发现了高于尼安德特人的来自丹尼索瓦人的基因占比。更有意思的是，2008年甚至发现了尼安德特人和丹尼索瓦人的混血后代。

智人的优势？

前面强调过尼安德特人的强大，可为什么作为后来者的“智人”能后来居上并且取得最终的胜利呢？这背后依然有很多的谜团有待解开。

此前一个比较流行的观点是，一个名为FOXP2的基因的突变，使得我们具备了驾驭更加复杂语言的能力。这为我们组织协调狩猎或战斗提供了更大的优势。但后来的研究又对这一猜测提出了很大质疑，即这个突变也并不独特，没有出现选择性清除的现象。

另一个关于基因的原因也挺有说服力。前面讲过，非洲内部族群有着更高的基因多样性，这或许使得智人整体而言对环境有着更高的适应能力。还有一些分析认为，只要在出生率、死亡率或生育间隔上有一点微小差异，经年累月后就足以产生巨大的人口差异。所谓人多力量大，我们的祖先可能就是占优势的这一方。

总之，又是一个各有各的道理，但却没有明确答案的问题。但考古证据也表明：相比于同一时期的尼安德特人，智人制作的工具更加标准

化、材料丰富化、组合多样化；无可辩驳的艺术和个人装饰品的大量涌现，也暗示了抽象思维能力的出现。在编织、缝纫、搭建火塘等领域，智人的技术水平更是远高于尼安德特人[14]。

总之，或许正是因为这样那样优势的积累，智人最终走出了非洲、走向了世界。伴随着扩散，智人还进一步“淘汰”或“融合”掉了所有更早来到那些地方的“当地人”，成了唯一或者仅存的“人”。

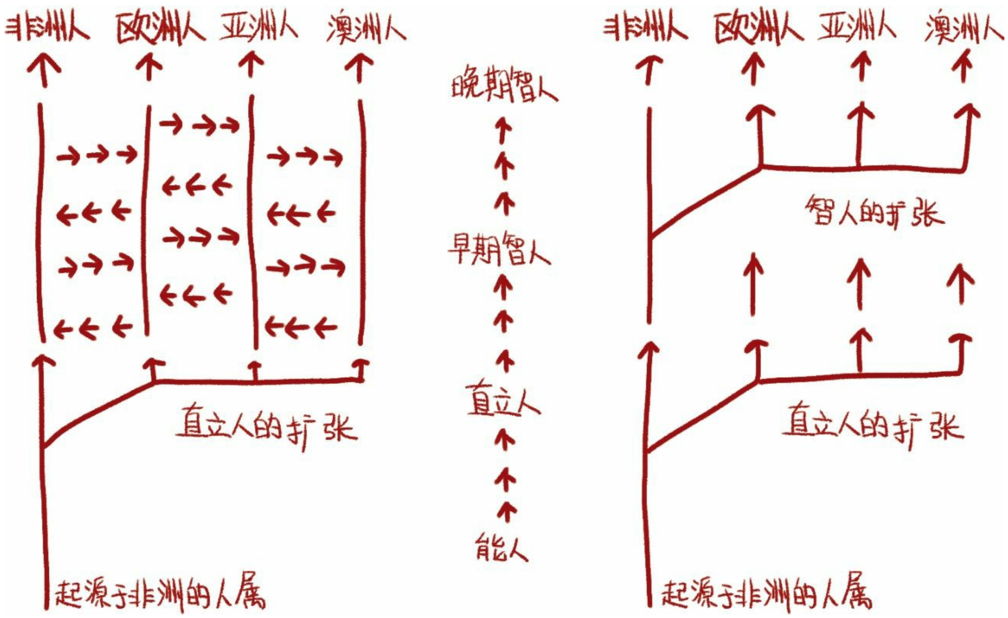
智人的时代，就这样开始了！

为什么我们来自非洲？

到这里，人类走出非洲的故事也就讲得差不多了——我们来自非洲，从广义上来讲这一点无可争辩。但我们也一直会听到许多声音，似乎想说明，欧洲人、亚洲人、非洲人都是由更早走出非洲的直立人在当地独立演化的。而之所以不同地方的人可以顺利通婚并且产下混血宝宝，则是因为这些直立人后裔在历史上一直存在着生殖交流。

“我们中国人的祖先，可不是来自落后的非洲，我堂堂中华民族可是元谋人、北京人、蓝田人的后代！”甚至一部分国内的人类学学者也依然是这一观点坚定不移的支持者。或许，读到此处的你，也会有同样的疑问：凭什么要相信这个故事呢？或者说，科学家凭什么得出这样的结论呢？

原因不外乎我坚定地相信分子人类学！而前一种观点的论据，更多的还是来自体质人类学，这种分析方法更多地依赖于测量与观察。作一个不是特别恰当的比喻，好比我们已经学会了英语，但遇到英国人的时候还硬要靠表情和手势交流[15]。因为分子人类学的证据就在每个人的身体当中，甚至不怎么依赖考古出土，所以样本充分、证据明确。



多地起源说（左）和非洲起源说（右）

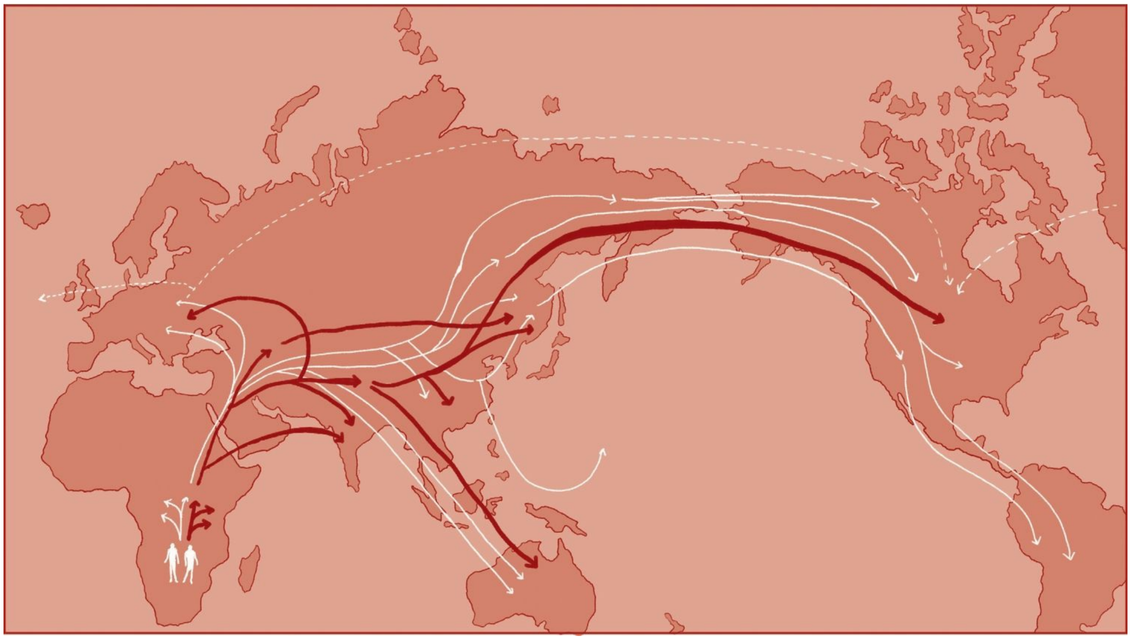
简单来说，基因在遗传的过程中可能会出现一些微小的突变，好比：

最早一个部落的图腾是一百面白旗；他们的后代开始迁徙，其中一支，图腾出现了微小的变化，第39面白旗变成了红旗；再后来，他们的后代又发生了变化，除了第39面是红旗外，第27面又变成了蓝旗。以此类推，尽管到后来，分散在各地的部落后裔，图腾可能是五颜六色的，但我们依然能够根据不同部落旗与旗之间的相近关系，倒推出整个部落的扩散路径。

分子人类学的证据，有点直接和古人对话的意思。换句话说，根据对不同人群的线粒体的分析，我们可以绘制出我们母系血统的起源、分化与迁徙路径。而针对男同胞的Y染色体的分析，又能绘制出我们父系血统的起源、分化与迁徙路径。顺着两条路径一路向前，我们又会发现：起点都在非洲。

我们所有人的外婆外婆的外婆的外婆……，出现在16-20万年前的

非洲；而我们所有人爷爷的爷爷的爷爷的爷爷……，大约出现在34万年前的非洲，无一例外（详见第六章第3节）。



线粒体（细）、Y染色体（粗）扩散路线图

提起非洲人，尤其是撒哈拉以南的非洲人，大家似乎总以为那就是一种人——黑人。但从基因的角度而言，那里的人种远比我们想象的更加丰富。从基因层面来看，撒哈拉以南非洲内部一些族群之间的差异甚至远大于东亚人和欧洲人之间的差异。也就是说，从亲缘上讲，非洲以外的欧洲人、东亚人、大洋洲人之间的关系比留在非洲的非洲人之间的关系更加接近。某种程度上，非洲以外的智人，仅仅是智人这棵树上的一条小分支而已。

小知识点补充

接下来的故事

大约在5万多年前，我们的直系祖先开始迅速从非洲向外扩散。

他们先是抵达了中亚，随后，其中的一部分就开始向欧洲进发，对尼安德特人的领地展开了持续近万年的争夺。

另一部分则经由当时的“海上高速公路”一路进入澳大利亚，成了澳大利亚的原住民；还有一批则来到了富饶的两河流域。

当这片土地能承载的人口也趋于饱和时，又有一部分人掉头向西，去往欧洲；还有一部分则一路向东，沿着喜马拉雅山的南麓进入了东南亚。

这其中有一部分开始北上，赶走了最后的丹尼索瓦人，成为东亚的新主人；另一部分则南下，进入了印度尼西亚。

在东亚安营扎寨的这部分智人中，有一部分又继续向着更寒冷的北方进发。大约2万年前，经由连起来的白令海峡进入了美洲，进而又一路南下，直到南美洲的最南端。

大约1.3万年前，印尼的弗洛勒斯人灭绝。智人，也成了人属物种的唯一存在。属于人类文明的太阳已经在地平线上呼之欲出了。

线粒体夏娃，美国总统都是一家人？！

相信绝大多数人，对于自己父母的父母们的称谓都非常熟悉。父亲的父亲是爷爷，正式叫法是“祖父”；父亲的母亲是奶奶，正式叫法是“祖母”；母亲的母亲是外婆或姥姥，正式叫法是“外祖母”；母亲的父亲是外公或姥爷，正式叫法是“外祖父”。

没错，这一点都不难。那请问：父母的父母们的父母们，他们的称呼又是什么呢？

父亲的父亲的父亲——曾祖父；

父亲的父亲的母亲——曾祖母。

这一对应该比较容易。那么，父亲的母亲的父亲或者母亲的父亲的母亲又该怎么叫呢？虽然各地对于这类直系长辈都有自己的叫法，但在汉语中依然有统一的正式称呼：

父亲的母亲的父亲——曾外祖父；

父亲的母亲的母亲——曾外祖母；

母亲的父亲的父亲——外曾祖父；

母亲的父亲的母亲——外曾祖母。

那母亲的母亲的父亲和母亲的母亲的母亲又该怎么称呼呢？记好了：

母亲的母亲的父亲——外曾外祖父；

母亲的母亲的母亲——外曾外祖母。

你是不是还想问，父亲的父亲的父亲的父亲或母亲的母亲的母亲的母亲，又或者父亲的母亲的父亲的父亲和母亲的父亲的母亲的父亲，分别怎么称呼呢？不要问我，除了父系这一支一直往上的“高祖父、高祖母”这一对可以确定之外，其他的这些祖先的正式叫法，真的可以绕晕不少人了。

总之，像是“母亲的母亲的母亲的父亲”或“父亲的母亲的母亲的母亲”到底应该怎么称呼，以及外高祖父和高外祖母，对应的分别都是谁。反正我基本是不知道的——也欢迎大家通过各种方式告诉我。

的确，绵延数千年的父系社会，使得我们中国人在谈论祖先的时候，通常都是顺着父系这一支一路谈论上去的。相比于其他的祖先，父

亲的父亲的父亲的父亲的父亲的父亲……他地位的崇高性，似乎是远高于其他祖先的——虽然，他与同代的其他祖先，对你基因的贡献几乎没有什么差异。

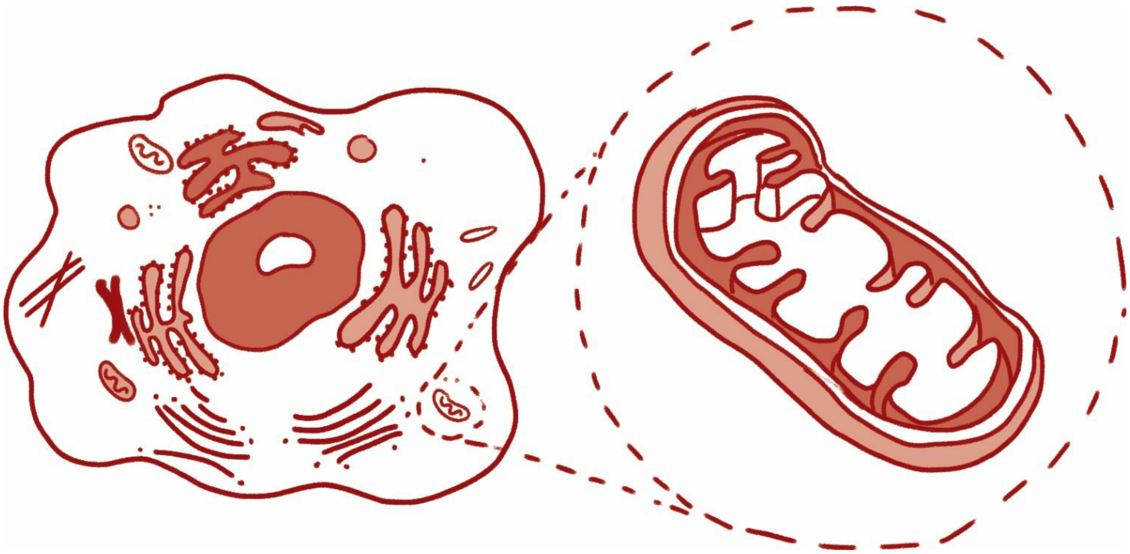
当然，如果你是男性，那他对你来说的确又多了一层意义——你们Y染色体内的遗传信息，几乎一模一样。这也是许多父权主义者主张孩子要跟父亲姓，是具有天然正确性的一个重要论据。

但我们接下来的主角，却并非“他”或者“他们”。我们将从母亲的母亲的母亲的母亲……这条线索出发，去追寻一位古老的祖先。她是包括你我在内，我们所有人的共同“外高外高外高外高祖母”。

你或许会问：如果从父系这条线向上追溯的话，我们似乎可以凭借着Y染色体这条强有力的线索。那母系这条线靠什么追溯呢？这是一个很好的问题：同样有一个关键的线索——线粒体。

什么是线粒体

这是一种存在于绝大多数细胞内的细胞器，是细胞中制造能量的结构，被称为“power house”。比较特别的是，线粒体有着自身的遗传物质和遗传体系，可以说是非常傲娇的存在。当然，它们的基因组大小有限，属于半自主性细胞器，大名鼎鼎的叶绿体，也属于这种类型。除了为细胞供能外，线粒体还参与细胞分化、细胞信息传递和细胞凋亡等过程，并且拥有调控细胞生长和细胞周期的能力，对我们的细胞来说，是个十分重要的存在。



线粒体

这里又有个好玩的问题：为什么对细胞如此重要的东西，会如此特立独行地拥有自己的一套遗传体系呢？学术上的主流猜测是“内共生理论”。大约10亿到20亿年前，生命史上那著名的“无聊的10亿年”间，一种类似大肠杆菌的细菌占据在一种更大的微生物宿主体内。

大一点的微生物试图吞噬小的，而小的则努力寄生在大的微生物体内。久而久之，它们的微生物后代达成一种平衡，小型微生物为宿主提供一些有用的物质，反之亦然。最终，这样的共生关系，使得小型微生物在宿主体内几乎放弃了自我——退行性演化成了细胞器官。

从遗传学角度来看，线粒体几乎失去了大约4000种细菌性基因，最终在人体内只剩下37种。这些基因中的大多数引导着呼吸作用[(16)]的完成。这看起来似乎有些可悲。

当然，这并非它剩下的全部：大约1500种以前存在的线粒体基因活生生地存在于细胞核的染色体中。它们是怎么到那儿的？

首先，线粒体DNA的复制过程很容易出错，错误的积累也比细胞核DNA快得多；其次，DNA复制经常使基因倍增——这是演化出新功能的首要方式。假设一种重复的基因最终到了细胞核中，它会待在那里不

动，而线粒体原本的基因却在变异过程中消逝。因此，经过许多世代以后，线粒体把它们的基因移交给了细胞核。

所谓，把我交给了你，属于了你，却也改造了你。当然，目的是让我们都更好地活下去。线粒体的故事就先讲到这里。接下来，我们继续去寻找我们共同的“外高外高外高外高祖母”。这一过程需要借助线粒体的帮助。

你或许想问，为什么线粒体可以帮我们做这件事儿呢？这事儿其实不难理解：精子和卵结合形成受精卵时，精子中只有核染色体进入卵，而线粒体是不进入的；前面也说了，线粒体有自己独立的一套遗传体系。

这就使得一个人体内的线粒体全都来自他的母亲。所以，在代际传递的过程中，线粒体DNA的特点是较为严格地进行母系传递。也就是说：你线粒体中的遗传信息，和你母亲的、外祖母的、外曾外祖母的，几乎是一样的。这使得分子人类学对线粒体DNA与Y染色体DNA的溯源研究，一道成了寻找我们共同祖先的关键。前者对应了母亲的母亲的母亲这条线，后者则对应了父亲的父亲的父亲。

在分子人类学的研究中，这两者是至关重要的——就像分子生物学家通过DNA来确定不同物种之间的关系远近一样，分子人类学家也可以利用它们来构建出人与人之间的亲缘关系。再结合体质人类学、文化人类学、考古学和语言学的证据，就可以解答诸如“人从哪里来”“人种从哪里来”“民族从哪里来”等一系列的问题。

这些年，也有不少颠覆性的结论，比如在20世纪90年代初，分子人类学家对全世界人类线粒体DNA的抽样研究显示，现代人都是16万～20万年前一个女性的母系后代，她是全体现代人的母系最近共同祖先！

借鉴了《圣经》中人类女性始祖的故事，这位女性，被称为“线粒体夏娃”。你要是真按照中国神话的说法，叫她“线粒体女娲”，似乎也

没啥问题。总之，她就是我们如今所有现代人——无论是我还是你，还是英国女王或肯尼亚总统的共同母系祖先。

这里要强调一下：千万不要把“线粒体夏娃”的存在当作“夏娃”或者“女娲”又或者“地母盖亚”之类的神话确有其事的重要证据。很显然，这位我们的共同女性祖宗，也是其母亲所生的，而她的母亲、母亲的母亲也同样是全体现代人的母系共同祖先。只不过，她是这一串母系共同祖先里面最晚的一个。

而且，她至少生了两个女儿，并且，起码有两位女儿的母系后代，一直开枝散叶，延续到了如今。为什么非得是两个女儿？很简单，只有一个女儿的话，那她的女儿才应该是定义中的“线粒体夏娃”，不是吗？

此外，与创世神话有着根本不同的是，全体现代人类都拥有共同的女性祖先，并非意味着这位祖先的同时代只有这一位女性，或者说只有这位“伟大”的女性生育了后代。这很显然也不符合事实，只是说，只有她的“线粒体DNA”最终绵延至今。

所以，“线粒体夏娃”的真正定义是：“只考虑母系那一支的话，现在地球上所有还活着的人类的所有共同祖先中，离我们最近的那一位。”这句话又长又拗口，不过里面的关键词还就是一个都不能少[(17)]。事实上，那个时候肯定有很多女性，而且她们的其他基因也很可能传递到了现在，只不过她们的线粒体基因没有传递到现在而已。

类似地，在人类历史上还存在一个“Y染色体亚当”，他是全体现代男性的父系最近共同祖先。据最新的推算，他生活在大约34万年前。对比“线粒体夏娃”生活的时间，几乎早了一半。所以，虽然以亚当、夏娃称呼他们，但这一对全人类的共同父系祖先和母系祖先是万万不可能像神话那样凑成一对儿的。

关键的问题来了：明明在“线粒体夏娃”和“Y染色体亚当”的年代，一定有其他的人类存在，而且，他们中的大部分也一定都繁衍出了后

代，可为什么，唯独就他们的线粒体或Y染色体，硕果仅存、延续至今，并且开枝散叶成了全人类的共同点呢？

小知识点补充

美国总统都是一家人？！

数年前，美国加州的一位小姑娘在做作业时偶然发现了美国除第八任总统范布伦之外，所有的总统竟然都有一个共同的祖先——1215年签署大宪章的英王约翰。这条消息迅速激起了各种惊讶和感叹的声音，从权力在民主社会的隐秘世袭到共济会的阴谋论，不一而足。

但是只要稍微多加一些思考，就会发现“美国的所有总统都有共同的祖先”这件事，不但不应该令人惊叹，反而应当是显然的事。事实上，随便从中国选取几十个人，他们在若干年前都几乎一定会有一位相同的祖先，这是很容易计算出来的。

简单做一个估算：一个人的父母辈有2人，祖父母辈有4人，曾祖辈8人，高祖辈16人。依此追溯，向上追溯至第n代祖先会有2^n位祖先。以平均20年一代人来计算，一个现代美国人在1215年的祖先共有240个人——这个数字已经接近1.1万亿人了！

很显然，当时全体人类的总数也远远小于这个数字，甚至从有人类至今出现过的所有人类数量之和也远远不及这个数字。这还只是向上推到1215年而已。那么，这些多出来的祖先又是怎么回事呢？

只有一种可能性——在我们这条反向追溯的直系亲属家族树上，出现过无数次的重复，即爷爷的爷爷的爷爷的爷爷的爷爷的女儿的孙子的孙子的孙女可能和爷爷的爷爷的爷爷的爷爷的爷爷的儿子的孙女的孙女的孙子有了爱情的结晶，而这个人又可能是你的外婆的外婆的外婆的外婆。或许，听上去会让你觉得有些不适，但很遗憾，这就是

我们每个人的先祖的共同情况。

我们都是一家人，广义上讲，就是这样。

我们都是一家人

我们身上的遗传信息，是千千万万的祖先拆分、结合、再拆分、再结合的产物，几乎每一位祖先，或多或少，都在我们的身体密码中留了点遗产。但线粒体和Y染色体却不一样——如果只考虑它们。假如有一位母亲一辈子生下来并存活的孩子全都是男孩，那么，她的线粒体DNA就“断子绝孙”了。即使她的儿子们依然开枝散叶，后代生生不息。同理，对于一位只生育或者存活下女儿的父亲来说，也是如此，他的Y染色体一样“绝后”了。

与他们同一时代一起生活的其他母亲、父亲，几乎肯定也传下了很多基因。只是，他们后代的每一个分支都在某一时刻，经历了无后或只有男孩或只有女孩活下来的情况，于是最终都没能把线粒体、Y染色体传下来。或许，这还是会让你觉得违反常识。

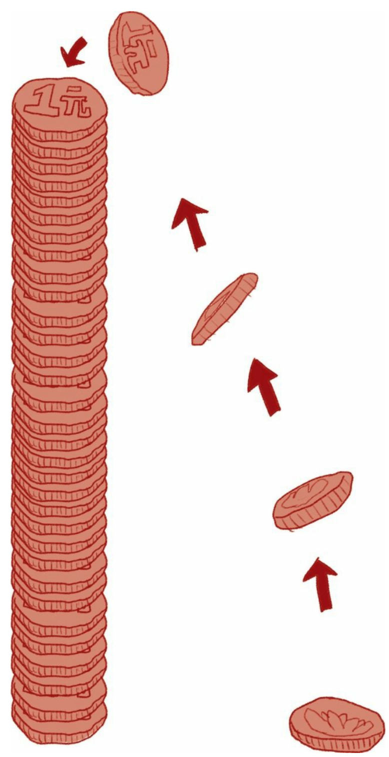
一定有人会问：十几万年前那成千上万名女性里，为什么就“线粒体夏娃”那么幸运，为什么就不能有好几位女性的线粒体同时传下来呢？

事实上，如果从我们的视角看，她就是那么幸运。尽管在当时，她只是再普通不过的一位生育了两个或以上女儿的女性而已。关于“幸运”这种有些抽象的事情，往往可以用“统计学”和“概率”来具象。

先说个结论：根据统计学上随机过程给出的推论，只要经过足够长的时间，总会有一位女性成为全部现存线粒体的祖先。即使在人口已经超过70亿的今天，与我们同时代的，生育了两个或两个以上女儿的女性，或生育了两个或两个以上儿子的男性，依然有可能成为千万年后地

球人的“线粒体夏娃”“Y染色体亚当”。

设想这样一种游戏：抛硬币。假定抛出硬币正反两面的概率都是50%。第一轮，每个参赛者有两枚硬币，抛出至少一个正面，进入下一轮，都是反面则出局。第二轮比赛，上一轮抛出两个正面的玩家，将拥有4枚硬币，一个正面的拥有2枚硬币，玩法依然一样，全是反面则出局，至少一个正面的进入下一轮。第三轮，依然根据上一轮抛出的正面数，加倍分配玩家的游戏硬币……就这样不断地玩下去。



你会发现，即使刚开始玩的时候，游戏玩家的数量可以有千千万万，但因为这是一个淘汰赛，一旦都抛出了反面，你就会出局，所以，每轮比赛，游戏玩家的总人数，一定是比上一轮要少的。与此同时，一定有一些特别幸运的玩家，在后期的比赛中将会拥有巨量的硬币。而且，这种优势在一段时间内似乎会不断地扩大。

经过一轮又一轮的比赛后，无论最初的参与者有多少，坚持到后期的，必然只有少数的幸运儿，而且他们手上应该都有着数量可观的硬

币。

不过别忘了，这是淘汰赛！无论你有多少硬币，只要抛不出正面，你就会被淘汰。而如果某一局比赛你的运气糟透了，比如64枚硬币只抛出3个正面，这在概率上完全可能，那下一局，你将只剩下6个硬币继续比赛。之前积累的巨大优势顷刻间就荡然无存。总之，只要这个比赛不断进行下去，一定会出现一个结果：

场上只剩下了一个获胜者，而他手上的硬币数量又极为庞大！

这就是“线粒体”“Y染色体”在遗传史上出现的情况：它们的遗传方式决定了，这是一场只许成功不许失败的比赛。一旦没有后代，或者没有生育下同性的后代，那单就“线粒体”“Y染色体”的角度而言，你就绝后了，绝无再翻盘的可能。

当然，由于遗传之路还有着诸如“突变”“自然灾害”“战争”等各种各样的不确定性，不可能像抛硬币游戏那样有着理想化的公平。但实质是一样的，无论从何时开始比赛，线粒体或者Y染色体的“统一”总会到来，或快或慢，但该来的总是要来的。

这并不是一次毫无意义的“杀神经元推理”，你也千万不要以为，既然我们每个人都有一个共同的母系或父系先祖，就意味着“我们每个人体内的线粒体与男性的Y染色体都是完全一样的了”。

一脉相承，并不意味着你与你的祖先完全一致，各种随机因素导致的突变，恰恰又是这其中的不确定性。就好像是手抄本的书，反复转抄了上百次之后，最新版和原版之间，一定有着或多或少的不同，可能是换了个标点，可能是多了几个词，甚至也可能漏了好几段。但这些变化，同样也无法改变这之后的若干版本的书与原著之间密不可分的联系。而对于科学家来说，又可以通过以上这些细节上的变化，来更好地回溯，不同版本间的传承关系到底是怎么一回事。

线粒体与Y染色体也是一样的道理——人类学家恰恰是根据对“线粒

体夏娃”和“Y染色体亚当”的生存时间推算，几近终结了一个古人类学界争论了近百年的关于人类起源的谜题：现代人类到底是不是“多地区起源”的？

比如，中国人，是否有可能是从70万年前至23万年前的北京猿人这一路演化下来，而不是十几万年前才走出非洲的那一支智人的后代？起码，从距今只有16-20万前的“线粒体夏娃”身上，我们可以得出这样一个结论：北京人的线粒体血脉并没有传承下来。作为智人的“线粒体夏娃”，她所在的种群就是全部现代人类的祖先。

肤色的由来，白人为什么那么白？

从小到大，除了被人反反复复地感叹我的身高以外，提及率第二高的是关于我的另一个特点，就是我的肤色。“哟，你一个男生怎么皮肤那么白啊”，“啧啧啧，这个皮肤换给我多好”，“不是才晒黑点嘛，怎么那么快就白回来了，真让人羡慕”。

不知道你听起来是什么滋味，反正对于我来说，每次都觉得十分尴尬——以至于，我对于深色的肤色，产生了一种强烈的痴迷。我天真地希望，没有任何防护的长时间日晒，可以赋予我焕然一新的“健康”外观。

防晒霜？这简直是我通向黝黑彼岸的严重障碍！而且，一个大老爷们用这个，是不是有点“娘”？

于是乎，一次又一次，我经历着“暴晒—晒伤—蜕皮—返白”这样的循环。直到2012年在墨西哥的海边，暴晒了整整一天后，那种用温水洗澡都疼痛难忍的滋味至今记忆犹新。更不用说之后浑身的水疱以及连续2天40°C以上的高烧了。要是经历了这样的痛苦真能让我皮肤就此变黑也就算了。结果你也知道，没过一个月，我又再一次白了回来。

在那之后，我买了人生中第一支防晒霜。

为什么有的人天生就容易晒黑？为什么同样都是东亚人，人与人肤色的深浅差异会那么大？高加索人、蒙古人、马来人、尼格罗人，不同人种之间的肤色差异究竟是如何造就的？真的要问“旭岽你为什么那么白？”这个傻问题之前，倒不如想一想：

这个世界上这些浅色皮肤的人究竟是怎么来的？

不知道你是如何想象上一节提到的“线粒体夏娃”和“Y染色体亚当”的。如果你真把他们的样子想象成了欧洲宗教画里描绘的那种白皮肤的高加索人的样貌，那你肯定是大错特错了。十几万年前的她和几十万年前的他，不出意外的话，肤色应该都是黝黑得很——通俗点说原因不难理解，毕竟，那会儿他们可都生活在从来就不缺少阳光照射的非洲。

那更早的时候呢？刚刚下树时的人类先祖，他们的肤色又会是怎样的呢？

祖先的肤色

故事还得从大约150万年前说起。

那时候，地球也经历了一次全球变暖，带来的其中一个结果，就是非洲这片土地上的森林大面积衰减。这就使得其中一部分原本在森林中谋生的人类祖先，不得不去大草原碰碰运气。

接下来的故事，按照惯常的解释则是：人类转战草原后，更高的气温、更强的阳光照晒、更大的运动量，使得人类浑身的毛发成了一种散热负担。热死，成了家常便饭。于是乎，一些基因突变的个体就获得了更大的生存优势。久而久之，我们就成了如今光溜溜的模样。套用《裸猿》中的话：

现存的猴类和猿类共有193种[18]，其中的192种身上遍布体毛。唯一例外的物种是一种全身裸露的猿类——他，自诩为人类。

不过，单纯为了凉快，脱去毛发真的是最好的选择吗？从表面上看，这种说法似乎很有道理，因为在大热天，我们的确倾向于脱掉衣服，一些奔放的男士巴不得打赤膊。但推敲一下你就会发现，这事儿似乎没这么简单。

毕竟，在如今的非洲草原上，动物可不只有我们“裸猿”这一家——猎豹、狮子、瞪羚、角马什么的，它们无一例外都是浑身披满毛发的。如果裸露真的那么有利于防暑降温的话，照理说，那些动物，尤其是体形和我们差不多大的那些动物，理应也变成“裸豹”“裸狮”“裸角马”了不是？！

稍加思考，你就会明白：在炎热的沙漠里，你是会选择一件衣服披着，还是在阳光下肆无忌惮地光着身子？有点生活常识的人，一定会选择穿着衣服，毕竟皮肤裸露固然有利于散热，但也更容易受阳光直射而被灼伤啊。现在明白阿拉伯人为什么爱穿轻薄宽松的长袍了吧。对于其他动物来说，体毛并非就只意味着御寒、伪装或者吸引异性。一身短且蓬松的体毛，在阳光的直射下，同样是非常理想的防晒装备。这下，问题似乎又变得麻烦了。

那到底什么才是促使我们的祖先集体脱毛的关键呢？

历史上的确涌现出不少关于这个问题的假说：有的说是体毛少，不利于寄生虫的寄居，从而使集体生活的祖先中那些相对光溜溜的个体更容易存活，这叫“寄生虫假说”；还有的说因为进食时身体是垂直的，被血水弄脏的体毛中就会滋生细菌，使他们容易生病，这叫“进食卫生假说”；甚至还有“水生猿或海猿假说”。

也有从性这个角度出发的：有人认为，雄性哺乳类动物总有比雌性浓密得多的体毛，因而一开始很可能是雌性的体毛先脱落，以此强化两

性差异，使自己更具性吸引力。后来因为遗传的缘故，雄性的体毛也越来越少了，但仍在某种程度上多于雌性，在某些特定部位还形成鲜明对比，比如胡子和胸毛……更有甚者，提出了全身裸露是为了交媾时可以相互抚摸，以此增强性刺激。

当然以上这些，都是假说——每一种都有合乎逻辑的地方，但也都有自己的“硬伤”。

散热假说

综合下来，相对最令人信服的，的确还是最开始提到的“更利于散热”的假说。只不过，更合乎逻辑的版本应该是这样的：

因为森林消退、食物匮乏而不得不下地开始狩猎营生的我们的祖先，毕竟是东非大草原的后来者。我们的生理结构，原本是为了森林里相对悠闲的树栖生活量身定制的。和草原上原本的猎物与掠食者相比，我们的生理机能可以说既不适合高速追逐猎物，也不适合长距离奔跑。但没办法，为了活命，有时候我们又不得不这么做。

好在，我们够聪明，借助智商和对简单工具的使用，我们依然能不时逮到些猎物。但不管怎么说，这依然是件辛苦的体力活——在烈日下追逐猎物，势必会使我们的体温急剧上升，这种体验肯定不好，甚至很多时候都是致命的。要不然，夏天也不会再三强调小心中暑了。

自然选择再次开始发挥作用，但不仅仅是脱毛那么简单，我们需要做的是尽可能地迅速降低运动时我们的核心温度。与毛发减少一同发生的，还有我们体表汗腺的日益发达。

别忘了，我们人类是现存排汗最旺盛的灵长类动物，全身约有500万个汗腺，一天出汗最多可达12升。汗液在蒸发的过程中可以有效地带走我们体表的热量，虽然体感上并不怎么舒服。而稀疏的毛发，又有利于加速汗液的蒸发。

于是乎，那些体毛更少的、出汗更多的勇士，显而易见就成了族群中的香饽饽，并且进一步将自己的生存优势扩大为了繁衍优势。毛发少和能排汗，逐渐也就成了我们这一物种的一个优势——这使得我们具备了长时间有氧运动的可能，也为物种进一步的发展提供了更大的生存空间[(19)]。

虽然这个过程是十分缓慢的，但优势一旦确立，它又会成为一个坚定不移的大方向。顺便说一下：在体毛退化的同时，如今现代人类非常讨厌的“皮下脂肪层”也开始出现了——毕竟，相比于酷热的白天，寒冷的夜晚也同样是要命的。而光溜溜的身子，显然不利于御寒。皮下脂肪层的出现是对体毛退化的一种有效补偿，而且值得注意的是，这层脂肪不仅能像毛发那样提供御寒保温的功能，而且，相比于毛发，在我们的身体需要迅速降温的时候又不会妨碍汗水的蒸发。所以，别总纠结于要把自己的体脂降到多低多低了，这可算是祖宗们留给我们的一件保命利器。

我们为什么会晒黑？

无毛一身轻的祖先们，要想在草原上肆意挥汗裸奔，还得面对一个棘手的问题：防晒。

阳光按波长的长短分为可见光、红外线和紫外线三大部分。因为波长短能量大，紫外线比一般的可见光更具有穿透能力。其中会对人体造成伤害的紫外线又可分为UVC、UVB和UVA三种。

这其中，UVC在进入大气时基本被臭氧层吸收掉。所以，阳光中的紫外线对我们造成影响的主要是UVB和UVA[(20)]。

UVB俗称紫外线“晒红段”，大部分被皮肤表皮吸收，可引起红肿、水疱、脱皮等急性症状，甚至引起皮肤癌。UVA俗称紫外线“晒黑段”，既能引起皮肤晒黑，又能直达皮肤真皮层，破坏胶原及弹力纤维，产生

光老化，并且这种影响是可叠加、可累积的，会对皮肤造成作用持久的晒黑及老化。这部分的知识，单纯是补充给许多像我这样不注意防晒的人听的，美白达人们肯定倒背如流。

问题来了，原本面对可怕的UVB，我们的祖先还能靠毛发，光溜溜了之后，靠什么呢？

答案就是：变黑。

皮肤在晒后变黑的这一过程，恰恰就是我们适应环境的一种表现。当你的皮肤受到紫外线辐射时，皮肤里的黑色素细胞开始活跃起来，释放黑色素吸收紫外线，以保护皮肤免受紫外线的伤害。正因为如此，黑色素细胞突然非正常地增多，最终移动到皮肤表面，使皮肤变黑。

小知识点补充

晒黑的机制

如今，在我们皮肤基底层的基底细胞中，大约有10%是黑色素细胞，它们具有树枝一样的外形，穿梭在表皮细胞内。当阳光照射皮肤，尤其是UVA波段的紫外线照射皮肤时，黑色素细胞就会被激发并且活化开始工作。黑色素细胞中含有色素颗粒，在粗内质网合成黑色素体，将催化酪氨酸进行系列反应，并生成黑色素蛋白，同时酪氨酸酶将失去活性，并担任运输工作，将其转移至角质细胞。

自然地，转移至角质细胞的黑色素蛋白越多，肤色也就越深。当然，如果不怎么晒了，随着血液的流动，细胞内的黑色素蛋白会渐渐排走，你的肤色又会逐渐变浅。两个进程的速度都是因人而异的。这套机制，又使得我们的肤色，一定程度上可以根据外周紫外线强度来智能调节。

有的人可能会想，“会晒黑”到底有什么好处呢？感觉上，变黑的皮肤不是更容易吸收热量吗？其实，这一过程的关键就在于：让这些释放出来并移动到皮肤角质层的黑色素蛋白去先行吸收紫外线，使紫外线无法伤害皮肤深层的组织细胞，防止造成更严重的伤害。说白了，黑色素细胞是咱们天生的遮阳伞。

你或许会说，UVA带来的变黑和皮肤老化，它们就不管不顾了吗？可以想见，对于活过30岁都成问题的祖先们来说，UVB带来的杀伤力，是远大于UVA对于我们外貌的影响的。更不用说，部分人群对于浅肤色的审美偏好的形成，也不过就千百年的历史而已。

也许有人想说，黑皮肤不是更容易吸收热量，从而让我们中暑吗？这又得回到前面说的那套优秀的散热系统了——有了它们的保护，这些多吸收的热量，并不致命，起码远不如UVB把我们晒伤来得要命。总之，平衡之下，基因选择了让我们会晒黑这一自保的策略。

黑人的出现

当然，对于长期暴露在非洲草原艳阳之下的祖先来说，更彻底的适应策略应该是：永久改变肤色，让我们够黑、够耐晒！

可以想见，这样的环境，使得那些更容易晒黑，或者天生更黑的人，有了更大的生存可能。逻辑上似乎没毛病，但我们的祖先为什么那么黑的真正原因，似乎也没那么纯粹。有一些科学家认为，基因做出这样的反应，更关键的原因是紫外线影响了人类繁衍后代。

这一切与叶酸有关。研究证明，大量紫外线会使人体内的叶酸快速分解。而孕妇如果缺乏叶酸，极容易导致流产或是胎儿畸形，这也是许多人的常识。

叶酸怎么来呢？偏偏人体自身无法合成，只能靠食物来补充，对于祖先们来说，叶酸的来源通常是树叶和野果。设想一下，在当时的情况

下，本就不多的叶酸，经过阳光的暴晒，又给晒走一大半，这可成了关乎繁衍的存亡问题啊。于是乎，更深的肤色除了让我们更不容易晒伤之外，又带来了阻挡叶酸流失的好处。

这变黑之路，想必是无法阻挡了。

浅肤色的由来

当然，一个重要的前提是，他们一直生活在阳光凶猛的非洲。走出非洲这件事，之前已经说过。对于这些离开非洲的早期移民来说，全新的环境，自然需要全新的适应策略。

到达欧洲、东北亚、美洲等高纬度地区的祖先，为了应对寒冷气候，除了穿上皮草御寒外，皮下脂肪的进一步增厚，也是显而易见的好策略。至于肤色的变化，惯常的说法是：由于不再需要阻挡强烈的紫外线，肤色就开始逐渐变浅。

但这其中其实也存在问题——按照黑色素能更好地吸收热量这一逻辑，此时浑身黝黑的祖先，似乎并没有必要非得再改变肤色啊，在阳光下，深色的皮肤不是更有利于我们感受温暖吗？可为什么，无论是欧洲人还是东亚人，大家的肤色都变浅了呢？

关键在于维生素D。

维生素D又名钙化醇。缺乏维生素D会造成生长发育不良、骨质疏松、新生儿严重疾病等问题。人体补充维生素D，一方面是借助肠道从食物中吸收，另一方面恰恰就是通过皮肤来合成的——人体皮肤表面和真皮层的7-脱氧胆固醇，会在紫外线照射下转化成维生素D的活性形式，继而被人体吸收利用。所以紫外线也是人体补充维生素D的重要条件，这也是一直鼓励小朋友要多晒太阳的缘故了。

对于高纬度地区来说，紫外线照射本来就偏少，如果还被深肤色给阻挡掉大半，这就会严重威胁后代的生存。最终，无论是欧洲还是东

亚，相似的环境，让基因在肤色这件事情上，做出了相似的选择。

更有意思的一点在于，浅肤色真正流行起来的时间，其实并不算早——起码对于欧洲人来说，也就是过去6000年左右的事儿。那期间，一个与白色皮肤有关的SLC24A5基因突变席卷了欧洲，但同时该基因突变在东非人群中也很常见。

这个长长的故事，讲到这里，算是讲得差不多了。再简单地梳理一下：最开始，在森林中生活的毛发浓密的祖先，肤色其实并不深，甚至很浅；离开森林来到草原后，伴随着脱毛和汗腺发达、皮下脂肪增厚，肤色又变得越来越深；而走出非洲来到高纬度地区生活的祖先，为了合成足够的维生素D，又逐渐流行起了如今的浅色外观。

所以，以后再要问：黑人为什么那么黑？

倒不如问问：欧洲人或者东亚人，为什么这么白？！

人科的亲戚，那些猩猩们

现在你应该很熟悉了，我们人类是人科人属的智人这一物种。但人科人属这种表述，的确常会给人以我们“极其特别”的错觉。曾经，的确也有过把人列为一个单科、单属、单种的做法，但是大量的分子生物学证据已经表明，这种做法已经严重过时且不符合事实了。

如今在人科之下除了人属，还有黑猩猩属（P a n）、大猩猩属（Gorilla）和猩猩属（Pongo），而在国际自然保护联盟濒危物种红色名录（IUCN ver 3.1）上，除了人类之外，所有的大猿都至少被列为濒危物种。本章的第一节曾经介绍过人科动物的分家之路。而从基因组与人类的相似度来看，红毛猩猩约为97%，大猩猩约98%，黑猩猩则有约99%。

当然，以上说的都是“属”这一层面，具体到种，如今对于人科动物

还有更加细致的分类。相信不少朋友都知道，黑猩猩属下面其实又可以分出黑猩猩（P.troglodytes）与倭黑猩猩（P.paniscus）两个物种，而大猩猩属下则细分成了东部大猩猩（G. beringei）和西部大猩猩（G.gorilla），而猩猩属又分成了婆罗洲猩猩（P.pygmaeus）、苏门答腊猩猩（P.abelii）、打巴奴里猩猩（P.tapanuliensis）三个物种。

至于这几个物种的特点和现状，有必要和大家具体展开一下，毕竟，它们都是这颗星球上，与我们血缘关系最近的亲戚。就按照亲缘关系由远及近说起，首先是猩猩。

猩猩

在中文语境中，这是最容易被搞混的一个学名。因为提起猩猩，很多人脑海中的第一反应应该是黑猩猩或者大猩猩，反倒不是这种红毛大脸的家伙。但事实上，当我们谈论猩猩这个词时，从生物学的角度看，应该就是特指这一属的生物。在分类上，人科可以细分为人亚科与猩猩亚科，而猩猩亚科之下，就只有猩猩这一个属。

因为浑身长满红毛，所以它们有个更通俗的名称“红毛猩猩”。记得曾经在动物园里，隔着一层玻璃，和一只红毛猩猩有过一次令人印象深刻的对视——这种对视，会让我觉得我面前的根本不是一只动物，而是一个正在试图用眼神向我传递情绪的人。有意思的是，在马来语中，它们的名字读作“orangutan”，其中“orang”是人，“（h）utan”是森林，“orang-utan”便是“森林人”。

前面说了，猩猩属在人科中与我们的关系最远，其下又分为了生活在加里曼丹岛上的婆罗洲猩猩、生活在苏门答腊的苏门答腊猩猩以及生活在苏门答腊岛北部却与婆罗洲猩猩亲缘关系更近的打巴奴里猩猩[21]。这三种猩猩从外表上看很难分辨，毕竟分化的时间不长，所处的环境差异不是很大，所以曾一度被当作同一物种的不同亚种。可实际上，在约150万年前加里曼丹和苏门答腊岛分裂开之前，它们就开始了独立的演

化。

历史上，猩猩曾广泛分布于东南亚、印度，甚至中国南方许多省份都曾经发现猩猩的牙齿化石，那时它们的分布范围和种群数量都远比现在大。今天，它们仅存于加里曼丹和苏门答腊两座岛屿的热带雨林中，极度濒危，也是现存的除智人外，唯一分布于非洲之外的人科动物了。



婆罗洲猩猩

除了红红的毛发，猩猩另外一个让人印象深刻的特征就是它们的“大脸”了，当然这仅限于成年的雄性。这种由脂肪组成的肉垫究竟是做什么用的呢？现在认为，这些肉垫和喉部的喉囊连在一起有声音共鸣的功能，雄性猩猩能够发出长而久的吼叫声，用来宣布领域、驱赶贸然闯入的其他雄性，同时还有召唤雌性的功能。随着年龄增大，肉垫也会越来越大，让脸部看起来更大，显得更威武一些，这样的特征主要是用于求偶炫耀，通俗点说，对于雌性来说，脸越大的雄性猩猩也越帅。

别看块头不小，其实猩猩的行动缓慢，攻击性也不强，主要以水果、种子、树叶和昆虫为食。在野外，猩猩宝宝诞生后，会和母亲一起生活6～8年之久，其中喂奶的时间就长达4年，而雄性猩猩却不会承担哺育幼崽的责任。

除了外貌，猩猩的一个重要特点，就是它们很“独”——相比于其他

的人科动物，猩猩是唯一过独居生活的。相比其他大猿，这其实很不正常。有证据显示，猩猩也曾有过群居生活史，只是后来不得已才选择了独居。原因或许就是在晚更新世末期，它们遭遇了横扫整个旧大陆的人类。想一想，这种温顺的大块头，是不是一种理想的蛋白质来源[22]？面对强大的人类，猩猩们也只好隐居深山。但仅靠着树上的吃食，并没有办法维系群体生活。而且，猩猩并没有固定配偶，雌性猩猩的生育间隔还很长，这就使得即使同一个母亲所生的孩子，彼此之间也没办法产生情感。

如今，随着原始森林被大量砍伐，它们的自然栖息地日渐减少，并且被相互分割而破碎化，它们的日子更加举步维艰了。20世纪初，野外还有超过30万只猩猩。目前，除了仅存约800只的打巴奴里猩猩，婆罗洲猩猩的野外数量仅为5万多只，而苏门答腊猩猩则更危险，现存的种群仅剩1万多只。

大猩猩

接下来要说的，就是人亚科的大猿了。按照亲缘关系由远到近的原则，先说说“大猩猩”。大猩猩属下有两个种：西部大猩猩和东部大猩猩。分布上顾名思义，一个生活在东部，一个生活在西部，各自的分布区间隔了上千千米。西部大猩猩体形相对纤细，所以有能力在树上生活；而东部大猩猩粗壮的身体让它们更适合居住在地面上。

大猩猩是现存人科动物中体形最大的一类，同时，它们也是个头最大的灵长类。成年雄性体重近300千克，身高超过1.7米，由于它们无法伸直膝盖，因此实际体长要更长，臂展2.7米以上，上肢肌肉发达。相比之下，雌性的个头要小很多，体重在70～90千克。当然，无论雌雄，相比于人类的平均水平，体格上都是有着碾压优势的。

因为身形巨大，大猩猩长期被人们当作一种恐怖、暴躁的动物。无论是《金刚》还是《猩球崛起》似乎都存在这样的偏见。现实中，大猩

猩其实挺“岁月静好”的，性格也算是稳重，虽然有着令人难忘的犬齿，但是饮食上却偏好素食。提起大猩猩，最经典的一个动作莫过于用手敲打胸脯了。其实，无论雌雄，它们都会这样做，而这种动作也并非就代表着它们正在宣战，大部分时候，仅仅就是表示自己的存在而已。



东部大猩猩

或许你还听过一个“银背大猩猩”的叫法——这源于大猩猩的雄性在12岁以后背部的毛发会变白，随着年龄的增加，白毛区域会逐渐变大，颜色也会逐渐变浅。与前面提到的独来独往的猩猩不同，大猩猩过着一夫多妻的家族式群居生活，群体成员组成较为稳定，成员数量从3～5只到20～30只不等，首领通常就是一只年龄较大、身强体壮、富有经验的“银背”。

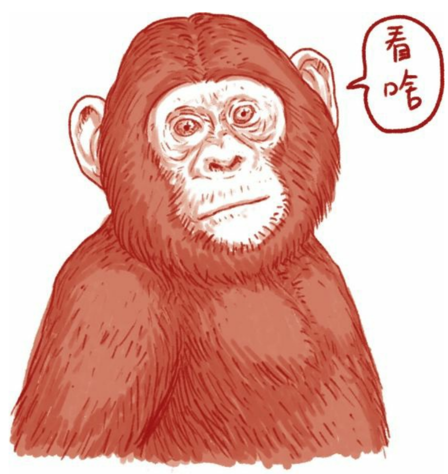
大猩猩有较为严格的社群制度，由首领决定群体迁移、觅食、玩耍、睡觉等活动的地点与时间。在与其他动物或同类争斗时，其他成员也听从它的指挥。遇到危险时，首领则往往会英勇地单独迎战。群体行动时，它也会在前面带路，其他成员则会在后面。在社群中，处在第二梯队的是生育了幼崽的雌性，而且，幼崽的年龄越小，雌性的地位就越高。第三梯队则是不满10岁的年青雄性，第四等级则是尚未成年，但已离开雌兽独立行动的幼崽。

这种等级意识会体现在它们的行动次序上：比如下大雨时，一只等级较低的成员寻找到一处干燥的地方刚坐下，如果这时来了一只等级较

高的成员，它就会立即站起来，毫不犹豫地将位置让出，若是恰好首领也来到这里，这只等级较高的成员又会马上将位置让给首领。雄性长大以后，会被驱逐出群体，雌性长大后，也可能脱离群体，另找雄性组建新的家庭。也会出现将老首领打败成为新首领的情况，不过这个过程比其他灵长类要漫长得多。落败的老首领，晚景并不好，会成为孤独且暴躁的流浪者。

在自然环境中，大猩猩没有任何天敌，但盗猎、森林砍伐，甚至埃博拉病毒都在严重威胁着它们的生存。

黑猩猩与倭黑猩猩



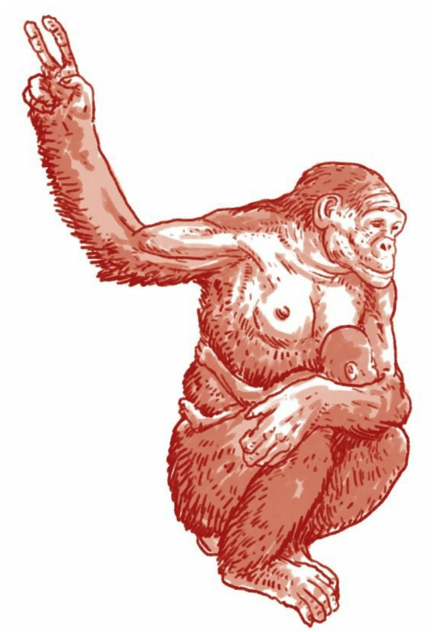
黑猩猩

接下来，便是人亚科中和我们关系最近的一个属——黑猩猩属。黑猩猩属下，又可以分为黑猩猩和倭黑猩猩两个种。黑猩猩的特征各位应该非常熟悉：未成年的个体，长得很萌，脸是肉色的；而成年后，面部则会日渐发黑。这里要注意，现实世界里，黑猩猩个头其实并不大，站立时身高在1～1.7米，体重45～80千克。

外形上，黑猩猩与倭黑猩猩其实也很难区分——尤其是成年后的个体，只能说黑猩猩的脸部在年轻时颜色比较浅，但在年长之后会渐渐加深，直至变成黑色。倭黑猩猩则从头到尾都是“黑脸”，并且在秃顶之前

会有滑稽的中分造型。另外，倭黑猩猩的个头普遍要比黑猩猩小那么一些，大约几千克的差距，体形较为纤细，下肢较为修长，肩膀较窄，以人的审美来说，可能身材更好一些，而且耳朵也比较小，毛发较黑猩猩更柔顺些。

当然，无论是黑猩猩还是倭黑猩猩，比起我们人类，要是论一对一肉搏的话，我们可能还真都不是对手。科学家对黑猩猩力量的研究很多，主要是通过观察黑猩猩搬重物的重量。目前最保守的研究认为黑猩猩力量是人类力量的1.5倍，也有研究认为它们可以达到强壮人类的3~5倍。美国麻省理工学院的学者研究认为，黑猩猩的肌肉纤维比人类长，影响爆发力大小的快抽搐纤维比人类多两倍，而影响耐力大小的慢抽搐肌肉纤维则不如人类多，所以人类更擅长需要耐力的长途迁徙。



倭黑猩猩

黑猩猩的社会

要真正比较黑猩猩属下这两个物种的不同，有意思的部分其实是这两个物种的社群模式，二者区别很大。前面说过，猩猩都是单身主义

者；大猩猩则是典型的一夫多妻，拥有庞大的后宫；黑猩猩，却是一种多夫多妻的父系社会模式。

怎么理解呢？家族内的雌性个体，在成年或者生育第一胎后，就会离开族群，远嫁他方。而其他地方嫁进来的雌性黑猩猩，其实是嫁给了这个家族的所有雄性，和大家都那啥[23]。忘了说一句，按照日本黑猩猩研究大神松泽哲郎的说法，在黑猩猩的世界是没有“祖母”这个说法的。

如果要强行用我们人类的方式去理解，那么一个母亲生的几个孩子，父亲既有可能是孩子同父异母的哥哥，也有可能是另一个孩子的叔叔甚至爷爷。而事实上，母亲其实自己也搞不清楚孩子的父亲到底是家族中的哪个成员。站在小孩的视角看，虽然不知道谁是父亲，但它其实拥有妈妈和“爸爸们”，如果黑猩猩会说话的话，那么父亲就是一个复数词。

这就是黑猩猩的社会构成形式：大致为几十个个体的规模，偶尔也有上百个个体的群体，组成一个地域集团。而在这个社群下，黑猩猩还特别喜欢搞小团体，它们不是整群整群地活动，而是三三两两地这样溜达活动。不过，这样的小团体是在社群内部。而如果遇到其他相邻的地域集团，那么社群内部就会团结一致，而两股地域势力之间的边境摩擦和流血冲突也会时有发生了。

前面提到的小团体，特指雄性黑猩猩——雄性黑猩猩在整片领地里三五成群地自由活动。而雌性比较孤僻，它们平时互不往来，在这片领地里再细分单独属于自己的地盘。也就是说，在雄性眼中，自己的领地里除了有各种好吃的，还有“共享后宫”。

黑猩猩社会内部的等级也非常严格，美国著名灵长类学家德瓦尔曾发现，低等级的雄性会头微低，手掌向上伸向高等级个体，采取一种“屈服式的问候行为”来表达敬意。具体操作起来是这样的：地位低的黑猩猩往地位高的黑猩猩跟前靠近的时候，会低着头、弓着背，让自己体形看起来更小，并发出“咕、咕、咕、咕”的声音。

作为回应，地位较高的那位会伸出手，轻轻触碰对方的头或者身体。所以，科学家通过观察它们的肢体语言，就能确定它们彼此之间的地位高低。德瓦尔在《黑猩猩的政治》一书中介绍：

黑猩猩这种动物等级森严，在黑猩猩的社会中，下对上的这种单向“问候”动作是统治与被统治关系的一种仪式化的确认。如果一只黑猩猩对自己的首领停止“问候”，那就是不服从的表示，甚至是准备“抢班夺权”的前奏。

比较有趣的是，黑猩猩是一个很讲“政治”的物种。德瓦尔在《黑猩猩的政治》一书中就记录过一个生动的例子。在荷兰的阿纳姆动物园，他开展过一个长达6年的研究计划。那时，他完整地观察了黑猩猩群落的一次权力更迭，那是一场漫长的政治斗争，时间大约持续了两年。

某年夏天，一只青年黑猩猩开始挑战老首领，先后经历了5场较大规模的战斗，直到冬天，终于取得了头领地位。不过，另一只更年轻的黑猩猩也崭露头角——取得了二号头领的位置，原来的老首领则位列第三。

不过，老首领并不肯作罢——他与二号头领组成了联盟，在次年春天发起“政变”，并且取得胜利。此时的头把交椅虽然名义上属于那只更年轻的家伙，但似乎雌性黑猩猩对它并不怎么买账。因此，有着更广泛“群众基础”的老首领，就这样在青年黑猩猩背后当起了“太上皇”。有点不寒而栗是不是？从这个角度看，政治的起源比人类自身还要古老吧。

好了，不聊这些险恶的东西了，说说黑猩猩的亲子关系。从寿命上来看，野生黑猩猩理想的情况下能活50多岁。雌性个体基本上10岁左右开始生孩子，平均每5年生一个宝宝，事实上雌性到死之前，都一直能产子，不像人类有绝经期。黑猩猩的哺乳期非常长，从小宝宝出生到断奶，差不多要4年！当然，这并不是说这4年里小宝宝的发育全靠妈妈的

乳汁，其实半岁时，已经可以吃一些固体食物了，只是它们会这么一直吸到4岁罢了。

这带来一个什么问题呢？要知道，雌性哺乳动物在哺乳期间会停经、停止排卵。哺乳结束后，由于激素又会恢复，这时才有可能怀孕。这就使得，小宝宝4岁之前，妈妈几乎没有可能再次怀孕——所以，在黑猩猩的世界，几乎无法看到两个年纪相差1～3岁这样的年龄相近的兄弟姐妹，而且比起人类，黑猩猩产下双胞胎的概率要更加低。

虽然生活在社群当中，但是父亲却并不承担孩子的抚养责任。孩子在5岁能基本独立之前，全靠妈妈带。父亲的职责，就是巡逻地盘，抵御外敌。女同胞也先别谴责黑猩猩爸爸的“大男子主义”，其实这种分工对于黑猩猩来说还是可以接受的，毕竟它们提供了“安全感”。在科学家的观察中也发现，当强壮的雄性个体在场时，雌性以及幼崽都会表现得更自在和大胆一些——从心理上，它们是需要“父亲们”的支持的！

倭黑猩猩的社会特点

与黑猩猩相比，倭黑猩猩最明显的特征恰恰是它们的社会结构，而这种结构也使得它们像是那种“嬉皮士”风格的和平主义者。

虽然，野生倭黑猩猩也是多夫多妻，但雌性地位相对更高，是典型的母系社会——雌性可以从雄性，甚至是最高等级雄性嘴边，把食物抢过来。而雄性不会有任何反抗，要知道这种行为在黑猩猩这种父系社会里是无法想象的。

最让人哭笑不得的是，研究者们发现，倭黑猩猩的邻近群体之间，很难会像黑猩猩那样发生“战争”。当两群倭黑猩猩相遇，雄性之间会很快产生对立的紧张情绪，但这时候，两群的雌性会进入对方的群体，和对方的雄性交配[(24)]，于是乎，这种紧张情绪也就在爱的氛围中逐渐缓解了。

在面对竞争时，两个物种的表现也截然不同。从激素水平来说，两只雄性黑猩猩面对同一堆食物，体内的雄性激素会激增，意味着希望靠干一架来解决争端；若是两只雄性倭黑猩猩面对同样的情况，它们的皮质醇激增，雄激素水平却没有变化——这说明它们陷入了焦虑和纠结的情绪。

倭黑猩猩为什么会和黑猩猩如此不同呢？这是因为刚果河的地理隔离，这两个物种在演化路线上的分歧其实少于100万年。不过，这也足够产生一些基因上的改变了。其中一个生理差异就是，“即使是处在停经期无法怀孕的时候，雌性倭黑猩猩也会发情并与雄性交配”。再想一想，相比黑猩猩社会那相当有限的交配窗口，想爱就爱，雄性倭黑猩猩对雌性的竞争就少之又少了，接下来雌性步入它们社会的核心，也就变得顺理成章了。

不过，最近的研究也表明，倭黑猩猩也不是如一些人所想象的那样，是一种“温柔的性瘾患者”。虽然观察的确发现，它们这种不以生育为目的的交配几乎没有性别与年龄差异的限制，但在观察中，研究人员也多次发现，对于它们来说“爱”也并不能解决所有问题。

族群内部，它们的“大女子主义”挺严重的，比如一群雌性会一起暴打一只不听话的雄性成员，甚至被观察到有雄性个体被雌性咬去了其生殖器的前端；也曾有记录证实，一些雌性会谋杀其他雌性的幼崽。虽然现实令人觉得有些失望，但这就是自然界！

猩球崛起？！

读了上一节，你是否有这种感觉——这黑猩猩也太吓人了——力量上对比起来，智人不占优势也就罢了，竟然还会玩政治、耍阴谋。联想到著名的《猩球崛起》系列电影，有没有这种可能：如果给它们足够长的时间去演化，它们最终会不会演化成“另一版本”的我们呢？

简单来说，如果人类还存在，将持续占据着智慧生物这一地球目前的最高生态位，所以黑猩猩并没有向这一位置发展的空间；而在电影当中，给实验室里的猩猩们喂食了促进它们智力增长的药物，最终让猩猩们开始像我们一样直立行走、开口说话，同时全人类得猩流感病退化，则只能理解为一厢情愿的科幻了，因为这一部分，有许多问题是目前还没有科学证据可以支撑的。

不过，这两个问题结合起来看，还是很有意思的。毕竟，黑猩猩是与我们最为相似的生物，那我们和它们身上，到底又有多少像与不像呢？而到底又是因为我们具备了哪些特点，才最终让我们区别于其他动物，成为人呢？

直立行走？

电影中的一个重要情节，就是大部分开窍的猩猩，采用了类似于我们这样的直立行走的方式。而直立行走，似乎是人之所以为人的一个重要标志，甚至是开端。那么黑猩猩真的有可能长期直立行走吗？

在一些电视节目里，我们的确也能看到习惯于直立行走的黑猩猩，但我们要强调，这并非黑猩猩的本性，而是人为训练的结果。在地面上，它们依然倾向于四肢并用地前进。

这其实可以从生理结构上寻找答案。要知道，咱们人体的许多结构是适应双足直立行走方式的，比如，由于下肢承受全部体重，人的脊椎长成S形，盆骨大而扁，胫骨很粗；而为了在行进中保持身体平衡，人的盆骨是碗状的——这样一来，肌肉可以附着在身体左右两侧辅助平衡。

但是对于黑猩猩来说，这些结构都不存在。它们适应在森林里四肢并用地攀爬，只能短暂地站立并走上几步。引用杜克大学人类学家丹尼尔·施密特（Daniel Schmit）的话来说：它们站起来感觉和我们半蹲一

样。请试想长期被迫半蹲着会是一种什么样的生活？简而言之，虽可以这样，但却并不舒服。

所以，如果按照电影的情节，猩球真的崛起了，那在很长一段时间里，它们可能并不会采用人类的行走方式。

使用工具？

不过，无法长期直立行走，是否就一定意味着它们无法解放出双手从而发展出更高的智能了？其实也未必，比如，日本科学家松泽哲郎的研究就认为，黑猩猩不是四足动物，其实是“四手动物”。毕竟灵长目最早的大本营可是在树上的，四手并用抓握树枝，才能把树栖生活的自由体现得淋漓尽致啊！换句话说，咱们人类其实不是进化出了两只手，而是下面两只手退化成了两只脚。

为什么要提及手呢？因为我知道，很多人似乎还抱有这样一种观点——人之所以为人的一个重要特点是对工具的制造与使用。但不得不说，这个观念已经不那么科学了，尤其在黑猩猩身上：

二十世纪六十年代，珍·古道尔观察到野生黑猩猩把树枝伸到白蚁窝里“钓”白蚁吃。这是人类首次发现黑猩猩使用工具，这个发现震惊了世界。黑猩猩还会用树叶和苔藓做成“海绵”吸水给自己擦洗身子。松泽哲郎甚至发现，野生的黑猩猩不但会用工具砸坚果，各个黑猩猩部落流行的工具还不一样，有的部落用石头，有的部落用木棍。即使是用石头砸，不同的地方，方法也不一样，有的会用两块石头，一块垫在下面当作砧板，而有的地方则不会。这种技能是小黑猩猩观察母亲的行为后掌握的——可以说是一种“文化现象”，甚至可称为“传承”。

当然，这里你或许还能说，它们仅仅是使用现成的工具而已，而并非制造——那接下来的事实就更加令人震撼了：

松泽哲郎也曾观察到，有黑猩猩会挑选专门的蕨类植物的复叶，咬掉前端，留出大约50厘米的长度，再把形成复叶的小叶弄掉，剩下一截没有叶子的叶柄，沿着叶柄留下尖尖的小叶基突，而且这种基突的间隔是有规律的。它们弄这东西干什么用呢？答案是用来捞一种水藻吃！此外，它们还会折叠一种宽宽的植物叶片，先纵向对折，接着用舌头将其折成百叶状，然后，它们会用这种形状的叶子取水来喝……2007年，研究者又观察到黑猩猩用手和牙把树枝削刮锋利，制成长矛，用来捕猎。

注意到了吗？这里，黑猩猩已经不是单纯地使用工具了——它们会对植物或石材进行一些加工，使之符合特定场景的使用要求，已经算得上是一种“制造工具”了。所以，当下一次我们要用制造工具来定义我们人类的时候，准确的表述或许是：可以制造并且使用复杂的工具。至于，要多复杂才算是复杂，估计又可以争论半天了。

投掷

对于黑猩猩的观察，还得出了一些很有意思的思考，比如：它们不仅会扔东西，而且扔得还很准。更重要的是，它们的投掷行为，有时候仅仅是为了引起对方的注意或者挑衅，而非单纯的捕猎或者攻击。经常会听到动物园里的黑猩猩向游客抛掷粪便的新闻。

要知道，这背后的动机其实一点也不简单。从神经生物学的角度来看，投掷工具这个行为其实很复杂。投掷动作可以拆解为举起、挥舞、跳起等一系列动作，这需要高度的身体协调。想要命中目标，则需要对目标的位置、移动路线等有一个预判。作为被投掷的对象，面对一个飞来的不明物体，肯定也不会毫无反应，无论是被激怒还是逃跑，对黑猩猩来说都是不错的结果——它们所期待的，是通过投掷行为从而实现对目标的一种“远程控制”。对心理学有一定了解的朋友一定清楚，控制感对我们来说是多么重要。

有科学家就对黑猩猩的投掷行为做了深入的研究——对大脑的扫描显示，扔得准的黑猩猩，用哪只手扔，对侧大脑皮层就更发达。90%的黑猩猩用右手，也就是大脑左半球更发达些。这些发达的部分包括大脑运动皮层，还有布罗卡氏区。后者在人中是大脑主管语言处理，以及和话语产生有关的区域，恰好位于脑部的语言优势半球，即左侧。莫非，善于投掷的黑猩猩语言能力更加发达？还真是！科学家进而又对黑猩猩做了各种能力测试。结果发现，善于投掷的个体，独独在交流能力上表现突出。

对此，科学家做出了关于人类更加大胆的联想：灵长类演化的过程中，倾向于用右手扔东西这件事儿，可能锻炼左脑，尤其是掌管语言起源的区域。这就为语言的起源创造了先决条件。

语言

到这里，一定有人开始联想到我们之所以为人的另一个重要特征：我们会说话，并且精于使用语言来进行交流。问题来了，黑猩猩，有没有可能“说人话”？

因为黑猩猩无法发出人类的语音，所以科学家只能用其他方式来训练及测试黑猩猩的语言水平，比如，手语、代表不同词汇的塑料符号、不同符号、分别表达各种意思的特殊键盘。

在过去，让猿或猴学习与人类说话或交流的实验并不少。不过，目前为止最成功的案例，也只能通过手语交流。比如，美国加州曾有一只名为Koko的雌性大猩猩，掌握一千多个手语单词，能够用手语表达情感，甚至还有两只猫作为宠物。即便如此，一直到去世，它也从没开口说过一句话。

还有一只名为Wiki的雌性黑猩猩，被完全当作人类婴儿抚养，研究者将其与自己的孩子养在一起，结果Wiki学会了几个简单的英语元音，

并模糊表达了若干简单词汇，此后便再无进步。

一个比较传奇的例子是黑猩猩Kanzi，它可能是世界上掌握人类语言最多的非人类。它会键盘语言，后来又学会了手语。有意思的是，Kanzi每次用键盘与研究者沟通时，嘴里都会发出声音。后来发现，这些声音并不是无意识的，而是在试图说话——发出的声音与键盘符号是一一对应的。

这类实验一度非常流行，世界各地都有一些经过训练掌握了简单手语或者可以通过图形语言与人交流的大猿，无论是红毛猩猩、大猩猩还是黑猩猩。可无一例外，都没有能真正“开口”的。后来，出于动物伦理，这类实验几乎已经停止。

可它们为什么无法开口说话呢[(25)]？从达尔文时代开始，科学界对此的解释一直分为两个流派。一派认为，大脑的限制决定了猩猩不可能像人一样说话，它们不能自主控制声道肌肉的收缩，因而不能灵活地发出各种声音。另一派则认为，声带的解剖学构造才是它们不会说话的关键。但两派观点都有各自的缺陷，谁也没能说服对方。对我们这些看客来说，可以暂且把两种观点结合起来理解。

从智力上来说，黑猩猩的智力大致接近6～7岁的孩童，照理是具备说话的智力条件的。再结合Kanzi的案例，也不妨设想一个大胆的实验：如果对某只聪明的黑猩猩进行外科手术，或者制造一种特殊装置，把黑猩猩发出的声音转化为人类语音，或许，让黑猩猩说出简单的“人话”也并不是完全不可能的事情。你也别太激动，它们的语言可以说是“简单至极”。



在这方面，日本的科学家也做过很多研究。比如前面提过的松泽哲郎，他还发现了黑猩猩语言使用的一些特点或者说是局限性：经过训练，它们可以理解黄色的菊花与表示黄色的图形符号之间的关系，但是建立了这种联系后，却不像人类那样可以看见黄色的图形符号后，再反向关联回黄色的菊花。在遣词造句上，它们的表达还是非常简单的，比如可以组成“红色苹果”“三个香蕉”“吃橘子”这样的词或短句，但无法表达出“吃三个香蕉”或者“五个红色苹果”这样程度的句子。

换句话说，它们的智能水平可能还不足以发展出更加复杂的语言，或者说，所谓“会说话的猩猩”都只是掌握了一些词汇，而非语言，因为语言的本质是一种有组织有规律的逻辑流动，就目前的研究来看，即便猩猩会手语，但也从没表现出这一点。而且，和人类最大的不同是，它们无法通过语言获得抽象思维的能力。更进一步说，比起常常活在过去或者未来的我们，黑猩猩似乎更愿意活在当下吧。

---

(1) 俗称红毛猩猩，详见第六章第5节。

(2) 即常说的新世界猴（阔鼻小目）与旧世界猴（狭鼻小目）。新世界猴产于中美洲及南美洲，相对于欧亚非大陆的旧世界猴。

(3) 现代人的脑容量通常是1500毫升左右。

(4) 主要指的是髋骨的髂骨部分。

(5) 双足行走的史前人科成员，可能是由南方古猿演化而来。傍人曾经被分类为南猿属之中的粗壮型南猿。首先出现于约270万年前，双足行走。大部分傍人的脑部只有现今人类的40%

大小。傍人的物种大小有些差异，但大部分站立时都高1.3～1.4米，且都是很粗壮的。

(6) 这一结论参考的是一个幼年个体的头骨化石，成年个体脑容量可能达到800毫升，这就已经超过现代成年人类脑容量的50%了。

(7) 这一娇小的物种就被认为是匠人的早期后裔。

(8) 包括世界各地的直立人以及在非洲等地的其他匠人后裔。

(9) 这里有一个有趣的迷思是，非洲海德堡人有没有可能是源于欧洲又重新进入非洲 的。

(10) 洞熊（Ursus spelaeus），是一种于更新世生存在欧洲与亚洲的熊，120万年前和其他的现生熊类分家，比现今的棕熊还要大30%，大约二万年前灭绝；洞狮（Panthera leo spelaea），是一种已灭绝的猫科动物，比现代的狮子壮大，四肢粗壮，平均全长可达2.7米，体重250千克。

(11) 丹尼索瓦人的学名未定，暂时名称为Homo sp. Altai或Homo sapien ssp.Denisova，是人属内一个已经灭绝、经由古人类化石的DNA所发现的人种。

(12) 长者智人头骨形态介于现代人和早期智人之间，已经具有了相当多的现代人特征，科学家将其划分为智人的一个亚种。

(13) 现代人的Y染色体中并没有发现尼安德特人的基因，因此科学家也推测，可能活下来的后代都是混血女性。

(14) 或者说证据远比尼安德特人来得充分。

(15) 当然，表情和手势也能帮助我们更好地理解对方所说的话，体质人类学如今依然也是人类学证据链中的重要一环。

(16) 获取能量产生三磷酸腺苷（ATP）。

(17) 相信肯定有不少人会觉得非常困惑，并且觉得违反常识——其实这其中涉及了一个非常有趣的数学推理，我们先放一边。

(18) 这个数字已经过时了，近些年又鉴定出好几个新物种。

(19) 后期甚至可以活活“跑死”猎物。

(20) UVB占到达地表紫外线总量的5%，UVA占到达地表紫外线总量的95%。

(21) 打巴奴里猩猩于1997年被发现，2017年被确立为独立的新种。这是1929年倭黑猩猩种建立之后的近百年以来，首次确立新的人科现生种。仅有约800只，是目前人科中数量最为稀少的物种，极危。

(22) 研究者曾在一个3.5万年前旧石器时期婆罗洲猿人的洞穴遗址中，发现了42具动物的遗骨，其中有40具是猩猩的。

(23) 对于雄性黑猩猩来说，最性感的异性，是那种年纪大到可以当自己祖母的雌黑猩猩。

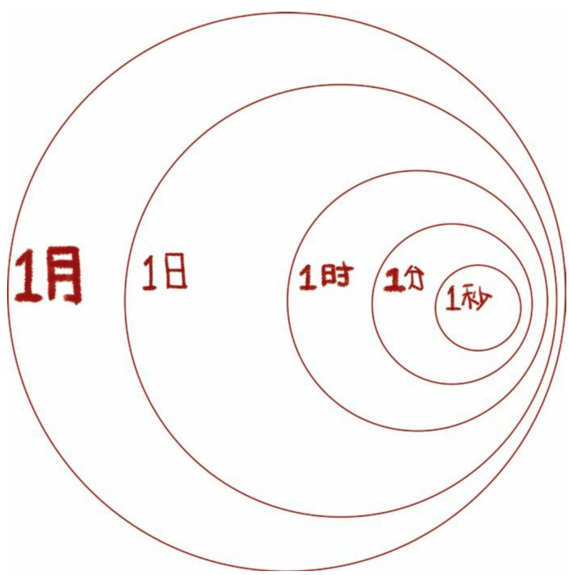
(24) 这不是以繁殖为目的的性交，而是通过性行为的快感来缓解潜在冲突所导致的焦虑。

(25) 虽然无法“说人话”，但在野外，黑猩猩也能够通过声音交流。不同的声音组合，也拥有不同的含义。而且，不同地域的黑猩猩在叫喊方式上还会有许多不同，类似于我们的方言。某种程度上，这已经不是单纯的自然本能了，而可以被认为是后天习得的结果。

番外　如果宇宙只有一年

很小很小的时候，我曾以为宇宙是一直都存在的，没有开始也没有结束。当然，后来知道真相的时候我眼泪掉了下来。前文说过，宇宙极有可能是起源于一次大爆炸，而这个时间大约是在138.2亿年前。

但是这样长的时间跨度，相比于我们比较熟悉的1秒钟、1分钟、1个小时，以至于1个月、1年，甚至10年这样的比较短的时间概念而言，好像太过漫长了，长到几乎难以想象。如果把宇宙以及地球的历史浓缩成一天，把漫长的时间压缩成一个我们比较熟悉的尺度，理解起来就会好很多。



1月1日1点1分1秒

把138.2亿年的时间压缩成1年，也可以看作一个真实比例的时间模型，比例是1∶138.2亿。接下来，我们就来看看这个加速了138.2亿倍的宇宙，一年的时间内，都经历了什么？

忽然之间，宇宙就诞生了。

现在通常认为宇宙始于一个奇怪的点，这个叫奇点，体积无限小、密度无限大、温度无限高，而这个时候时空曲率也是无限大的。

在大爆炸发生之后的10^{-43}秒[(1)]，也就是一个普朗克时间的跨度里，宇宙的温度大约就已经下降到了10^{32}开。在这个阶段宇宙已经冷却到了引力可以分离出来独立存在。在这个时候，宇宙当中的其他基本作用力，比如说强弱相互作用和电磁相互作用，仍然是混为一体的。

在宇宙大爆炸初期，膨胀速度非常快——宇宙从原子般的大小膨胀到高尔夫球的大小所需的时间是不超过万万万万亿分之一秒。就是在这个万万万万亿分之一秒的时间里，宇宙从一个高尔夫球又膨胀到了地球那么大，而且每过万万万万亿分之一秒这样一段时间，它就会按照这个比例继续膨胀一倍！

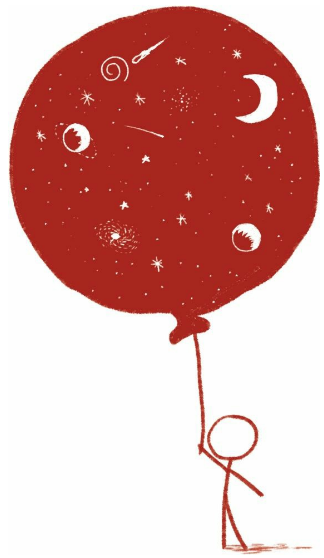
这意味着宇宙膨胀的速度要远远快于光速。又因为最初的事情发生得实在是太快了，所以我们就需要一个新的时间单位来描述物质的运动，这也方便我们去理解。

普朗克时间

简单地说，每秒中所包含的普朗克时间单位要比大爆炸以来所包含的每一秒加在一块都要多得多。宇宙诞生至今，总共走过的秒数我们不难计算，大约是4.36×10^{18}秒。即使我们把宇宙诞生至今的每一秒都拉长到138亿年，继续再去计算其中的总秒数，它还依然远远不及每秒里所包含的普朗克时间单位。由此，大家应该可以理解到，在我们根本感知不到的那真正的一瞬间，宇宙已经大到我们这些凡人无法理解的程度了。

那么在第一个普朗克时间之前，宇宙到底发生了什么呢？很遗憾的是，科学家也很想知道，但是目前不得而知。毕竟，这个时间尺度之下，现行的物理定律全部失效。因此，宇宙论学者在研究宇宙起源的时

候发现，在大爆炸之后，最早只能计算到10^{-43}秒，这是现在的理论认为的时间最短的一瞬的极限。要研究普朗克时间之前发生的事情，当前我们还缺乏新的定律。



大爆炸之后的10^{-35}秒，温度大约是10^{27}开。这就迎来了 “暴涨期”，引力已经分离，夸克、玻色子、轻子在这个时候形成，这个阶段宇宙已经冷却到了强相互作用可以分离出来。虽然说这个暴涨仅仅也就持续了差不多10^{-33}秒，但就是那么一瞬间，宇宙经历了100次的加倍。

到了大爆炸之后的10^{-12}秒，温度进一步下降，到了10^{-15}开，质子和中子及其反粒子形成了——玻色子、中微子、电子、夸克以及焦子都稳定下来，虽然说温度还是非常非常高，但是对于宇宙而言它已经变得足够冷，冷到电弱相互作用分解为电磁相互作用和弱相互作用。而轻子家族，比如说电子、中微子以及相应的反粒子则需要等到宇宙进一步冷却，冷却到了10^{-4}秒，才能够从其他的粒子的平衡当中持续分离。

到了大爆炸之后的0.01秒，温度已经下降到了大约1000亿℃，这个时候宇宙已经非常大。光子、电子、中微子为主，质子、中子占到了总质量的差不多十亿分之一，处在了一个热平衡态，整个体系还是急剧膨胀，不过温度和密度已经不断下降。又这样继续往后推进，大约到了大

爆炸之后的0.1秒，此时的温度大约300亿℃。到了大爆炸之后1秒，温度下降到了100亿℃，此时中微子向外逃逸，正负电子湮灭反应出现，不过这个时候合力尚不足以束缚中子和质子。

在这个真实的宇宙第一秒，“嘀嗒”那么一下，就是那么一刹那，发生了这么多的事情，极小的一个存在，已经变成一个极其宏观的存在。而这个时候，最早的原子核已经形成。

随着宇宙膨胀，电磁辐射的波段被拉长，相应的光子能量也就随之减少。差不多过了1万年，也就是我们压缩后的宇宙模型中的半分钟后，物质的密度追上了辐射密度并且超越它。从这个时候开始，宇宙和它的动力学开始被物质所主导。

又过了差不多30万年，在我们的宇宙模型中，时间来到了0.12分，宇宙的温度已经下降到了大约3000℃，化学结合作用使中性原子形成了，宇宙的主要成分是气态物质，并且逐渐在自引力作用下凝聚成了密度较高的气体云块。

相信通过前面的这段描述大家应该已经意识到了，在描述宇宙最初发生了些什么的时候，每个阶段所花费的时间都是指数级的差异，每个阶段和每个阶段之间所包含的时间跨度动辄就是成百上千万倍。而在中性原子形成之后，下一个显赫阶段对于真实的宇宙来说已经是几亿年之后了。

这一天，宇宙里有了真正意义上的明灯——最早的恒星诞生了。不过这个时候恒星一点都不“恒”，并不像我们现在所熟悉的太阳这样的恒久远、动辄百亿千亿年的恒星。最先孕育出来的恒星质量都是非常巨大的，诞生之后几十万年的工夫就烧完了，然后炸成了壮烈的超新星。



如果我们真的能够进入这个“加速宇宙”的1月中旬的话，那无异于一场宇宙尺度的超级烟花秀——几乎所有的初代恒星都在不断地炸成超新星，一颗接一颗地目不暇接。那么多的大质量恒星爆炸后，还顺便创造出了各种宝贵的元素，它的中心往往还会剩下点什么——比如黑洞。

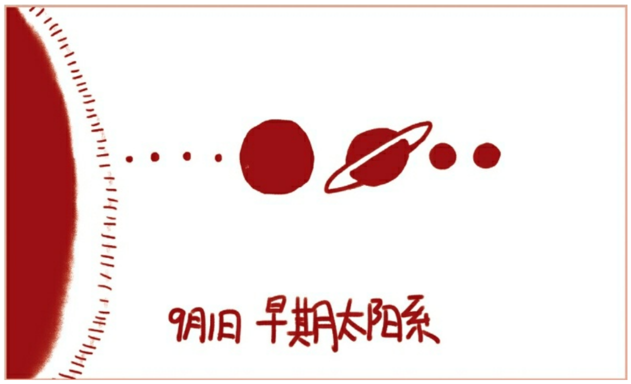
随着一些黑洞的并合聚集，就有可能会出现一些超大质量的个体，这些分布于早期宇宙各处的黑暗主宰们开始用自己强大的引力去重塑宇宙的秩序。渐渐地，在宇宙一些地方的恒星数量明显比其他一些地方多了很多。就这样过了大半个月，我们的日历已经翻到了1月26日，而这一天我们可以称为“星系纪念日”——我们能观测到的最古老的星系已经成形了[2]。



银河系经历了几十亿年的演化，最终才变成了如今这样漂亮的棒旋结构，而在这期间发生的事情对于我们而言，又可能会觉得有些无聊。

很多很多恒星诞生，也有许许多多恒星死亡，在第一代、第二代恒星的残骸当中又不断孕育出第三代、第四代恒星。

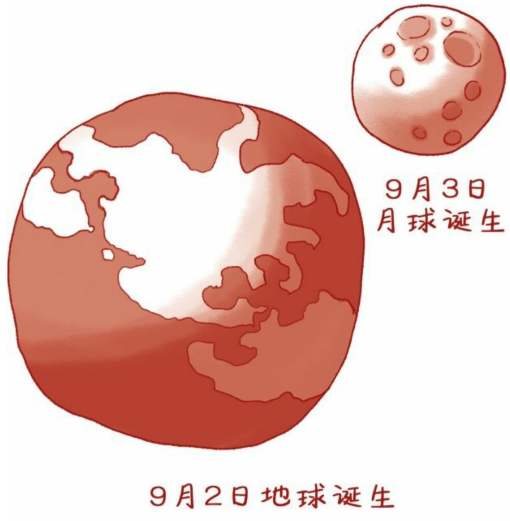
就这样，在我们这个宇宙日历中差不多有半年多的时间，并没有什么特别的纪念日了。当日历翻到了9月1日的时候，终于才有一个重要的时刻到来——太阳诞生了。



关于太阳的起源，几十年前的观点还认为太阳是在相对孤立的星云环境当中形成的。但是科学家通过对古陨石的研究发现，短暂的同位素，比如说铁60的踪迹就显示这种元素只能在爆炸及寿命较短的恒星当中形成。这就表示在太阳形成的过程当中，附近应该是发生了若干次超新星爆发，其中一颗超新星的冲击波可能在早期的分子云中造成了超密度的区域，从而导致了这个区域的塌陷。又因为角动量守恒，星云塌陷的时候转动加快，随着星云的逐渐浓缩，其中的原子相互碰撞的频率也就增高，把它们的动能转化为热能，质量集中的中心就越来越比周边环绕的盘更热了。

就这样，大约过了10万年的时间，收缩的星云最终扁平化成了一个直径大约是200个天文单位的圆形星盘，并且在它的中心形成了一个热质密的原恒星。

在这之后差不多5000万年的时间跨度里，太阳核心的温度和压力就变得越来越高，而到了某一个瞬间的时候，核心终于被点燃，氢开始剧变成氦，此时我们可以认为：太阳真正地诞生了！



紧接着到了9月2日：地球诞生了。星子们在引力的作用下逐渐聚拢，最后就形成了早期的地球；9月3日，月亮诞生。

关于月球的起源，现在比较认可的是这样一种假说：在地球轨道的附近，还一并形成了一颗火星大小的行星，我们把它叫作“原月球”，这两个天体在各自的演化过程当中都形成了以铁为主的金属核以及由硅酸盐组成的幔和壳，而当时的地球质量大约是如今的9/10，所以我们还不能叫它真正意义上的地球，就叫它“原地球”。

由于两个天体的轨道离得真的不算远，因此碰撞也就在所难免了。这一次壮烈的“太空华尔兹”不仅使得“原地球”的自转产生了偏斜，而且还使“原月球”碎裂——幔和壳变热蒸发，膨胀的气体裹挟着尘埃和少量的幔物质飞离了“原月球”，被分离的金属核因为受到膨胀气体的阻碍而减速，被“原地球”吸积，并且最终变成了如今地球的一部分。因此，地球的质量又增加了一些。

而飞离的气体尘埃物质受到地球引力的作用，呈现弹状分布在了洛希极限以外的空间里。它们又通过吸积形成了一些小天体，然后像滚雪球一样不断地吸积增长，最终形成了现在的月球。

9月6日，暴雨

在这时，地球还处在滚烫的炼狱模式。到了加速宇宙历的9月6日，可能有一场下了将近6个小时的暴雨——换成真实的时间，就是一场下了1000万年之久的大雨，这场雨最终形成了如今的海洋。

说起这场雨的来历，主要是因为起初地球的温度很高。虽然水是原始大气的主要成分之一，但由于原始地球的地表温度是要高于沸点的，所以当时的水都是以水蒸气的形态存在于原始大气当中。后来，地球内部的温度逐渐降低，地面温度终于降到了沸点以下，于是倾盆大雨就从天而降，降落到了地球表面低凹的地方，这就有了湖泊、海洋，甚至河流。

9月**14**日，氨基酸出现

原始的海洋就像一盆稀薄的热汤，里边的盐分比较低，后来是矿物质逐渐跑到了海水当中。而有机物质在那个时候是异常丰富的，由于当时的大气当中并没有太多游离的氧，因此高空中也没有臭氧层的阻挡，并不能吸收太阳辐射的紫外线，所以，紫外线能够直射到地球表面，成为合成有机物的能源。

此外，天空当中的电闪雷鸣、火山爆发所释放的能量，还有宇宙间的高能宇宙射线，甚至是陨石穿过大气层时所引起的冲击波等，也都有助于有机物的进一步合成，其中闪电被认为是比较重要的一个原因。渐渐地，海洋变得越来越富含有机物，而到了9月14日这一天，有了最早的氨基酸，这就为生命的形成创造了条件。

9月**22**日，生命诞生

差不多铺垫了3周的时间，9月22日这一天是一个伟大的时刻，在深海底的热液系统附近出现了最早的并不依靠阳光的原始生命形态，其中一些通过氧化热液系统当中喷出的还原性硫化物（比如硫化氢、硫化钠）为生，而另外一些则能够吸收利用“热烟囱”释放的热红外光来获取

能量，从而进行一些简单的代谢活动（详见第一章第1节）。

10月3日，光合作用

到了10月3日，经过了漫长岁月演化，这些原始生命祖先的色素在不断得到改进和提升之后，开始具备了利用可见光的能力，这个时候它就不再局限于海底的“热烟囱”或热液口周围，而是逐渐向范围更加宽广的光照区扩展。最终其中一部分获得了一种神奇的能力，这就是光合作用——蓝细菌出现了。

10月29日，大氧化

此时，生命对于地球这颗星球而言，便不再是微不足道的存在了——经过亿万年的努力，这些小小的微生物彻底改造了地球的大气。最开始的时候，地球并没有太多游离状态的氧，而如今大气当中的氧气占到了大约21%，这几乎都是拜生命所赐。在大约26亿年前，也就是加速宇宙历的10月29日左右，这些生命还造成了一次“大氧化事件”。这次事件也足以看出它们的实力，这就是著名的“休伦大冰期”。

根据地质考古的结果，这一时期大气中的游离氧含量是突然增加的，具体原因尚不得而知，目前主流的假说是这样的：由于蓝细菌的光合作用，地球上的氧气迅速增加，而破坏氧气的甲烷细菌所依赖的镍的数量急剧减少，这就使得大气中的含氧量大大增加。“大氧化事件”还使地球上矿物的成分发生了巨大的变化，这也令日后更加复杂的生命形态的出现有了可能。

11月9日，真核生命

虽然在生命诞生之后的几十亿年当中，它们都在慢慢地演化着，但是所取得的革命性成果并不多。不过在约20亿年前，也就是加速宇宙历

的11月9日，真核生物出现了。在此之前，我们所说的生命都是类似于细菌这样的原核生物形态，还有一些更加奇怪，我们只能叫它“古细菌”。而有了真核生物之后，真正意义上的细胞结构才出现，这样的单细胞生物也为未来更加复杂的多细胞生物打好了基础（详见第一章第2节）。

12月5日，多细胞生命

又过了1个月，这已经是一年当中的最后一个月了。此时，生命才刚刚开始像那么回事。比如，在我国华北燕山地区高于庄组中就发现了一个碳质宏观化石生物群，发现了很多化石标本，有一些带状、蛇状的，或者是长卵形等多种形态的相对比较复杂的多细胞生命。其中一种最大的蛇状化石已经长达28.6厘米，宽也有8厘米，另外一种带状化石的长度甚至达到了30厘米以上，宽也有4.5厘米，而且部分标本已经可以看到明显的固着器官。

12月12—16日，“雪球地球”

正当生命准备开始向着更加复杂的形态发展的时候，在距今8亿年到5.5亿年，也就是加速宇宙历的12月12日到16日，地球接二连三地被严严实实地冻上了（详见第二章第1节）。

具体的冰冻时间差不多分别是一年的12月12日9点、12月15日10点和12月16日21点前后。起因可能是大陆漂移到了赤道附近，反射走了大量的阳光，形成了系统性的风险，在接下来一系列的连锁反应之后地球被冻住了。而之后又是因为地球自己的内部能量，使得这一切最终出现了转机。就这样速冻解冻速冻解冻，一直到了差不多5.5亿年前，最后一次的“雪球地球”事件终于结束，而且再也没有发生过。

12月17日21:00，寒武纪生命大爆发

走出了“雪球地球”的魔咒，12月17日晚上的21点，生命不知道是怎么回事突然一下子变得丰富起来。



虽说到现在这一年还剩下半个月不到了，但是之后的事情变得越来越精彩了：

12月19日3点，早期的鱼类出现。

12月20日8点，大登陆时代终于拉开序幕（详见第二章第3节）。之后就有越来越多的动物开始向陆地进发，而在这之前植物也已经给地球的陆地做好了充足的准备，最早的裸蕨变成了真蕨。

12月21日15点，森林已经像模像样了。一些植物也在适应中发生着变化，其中有一些把它们传宗接代的孢子升级成了种子，这就是裸子植物，这也带来了一个好处，那就是它们可以向更加干旱的内陆进发。

12月23日6点，早期的两栖动物出现了，它们在岸边度过了一段美好的时光。

12月24日7点，在两栖动物当中出现了一些另类的家伙，它们开始不那么依赖水了，可以在干旱的环境当中生存，这就是羊膜动物（详见第三章第1节）。

12月25日14点，二叠、三叠纪大灭绝不期而至。这一次大灭绝比恐龙大灭绝还要惨烈，但毫无疑问，无论是陆地还是海洋，都迎来了大洗牌，属于爬行动物的时代到来了（详见第三章第2节）。

爬行动物当中的一些又爬回了水里，最终开启了鱼龙帝国（详见第四章第2节），而陆地上的一部分则演化成了恐龙，并且在12月26日的凌晨3点左右变得强大无比，这个时间差不多就是早侏罗世到中侏罗世交替的时候（详见第三章第3节）。

12月27日1点，真正意义上的哺乳动物出现了。我们也知道，因为这个时候的恐龙实在是太强大了，所以最早的哺乳动物普遍只能算苟且活着（详见第三章第3节）。

12月28日6点，源于恐龙的最早的鸟类就已经出现了（详见第五章第3节）。

12月28日19点，最早的被子植物应该也已经出现了。花儿和昆虫那一段恩怨纠葛和相爱相杀的协同演化史也由此拉开。

12月30日12点，又一次重要的灭绝事件，终结了恐龙的时代！



12月31日

在这一年的最后一天里，有那么一些与我们相关的重要时刻：

8点07分，灵长目里刚刚分化出了最早的人猿总科动物，这个总科包含了长臂猿这样的近亲；16点11分，这才有了真正意义上的人科动物，也就是类人猿的出现，当然我们也知道这个时候都还不能叫作人或者猿人；22点43分，人属的动物才最终出现。

离这一年的结束还有8分钟的时候，智人才刚刚出现。在此之后我们才开始走出非洲之旅（详见第六章第2节）。

23点59分32秒，农业出现了。我们的祖先终于不用再担心有了上顿没下顿，安定下来后，最早的文明即将出现。23点59分46秒，真正意义上的最早的文明苏美尔文明出现了。几秒钟之后古埃及人开始建造最早的金字塔，一直到了23点59分55秒，一个叫耶稣的小男孩诞生了，这就是公元纪年的开始。

在这“加速宇宙”最后一秒里的最初1/4秒，牛顿的《自然哲学的数学原理》发表了，一个关于科学的新时代终于来临；紧接着是第一次工业革命、第二次工业革命，电灯泡、计算机、原子弹、火箭、载人航天，以至于如今的智能手机。我们熟悉的一切近代史、现代史，都可以浓缩

进这一秒里。

而如果我们要把这一秒里的一切精彩都讲完，即使穷尽我们的一生都绝无可能！

小知识点补充

为何说生命短暂？

把宇宙的时间压缩了138.2亿倍之后，模型里的一个月就相当于真正宇宙的11.35亿年，而一天就有大约3784万年，一个小时相当于157.7万年，一分钟大概是2.6万年，一秒438年，所以在这个模型当中即使八九十年的人生也仅仅意味着0.2秒。

---

(1) 这里提到的1秒并不是1/138.2亿的1秒，而是现实中的1秒。

(2) 至今，关于星系的起源还让天体物理学家争论不休，包括银河系的确切年龄。但是现在主流的观点认为银河系在宇宙诞生的大爆炸之后不久也就诞生了，但是这一判断建立在宇宙演化及相关的一些理论假设上，所以还有很多争议。

终章　未来

被困在线性且单向的时间轴上的我们，除了常常通过回忆这种方式沉湎于过去，好像最愿意花时间去思考的事就是未来会如何。

基于过去的经验，我们可以对未来会发生的事情做出一种合理的推测。比如，预测明天中午我会吃午饭；8月我会穿短袖；明年我的发际线应该会更高。这样的预测，往往命中率极高。

还有一种是基于相对有限的信息而对未来进行的猜测，比如，有人说下周股票会大涨；下届世界杯冠军会是某支球队；3年内一线城市的房价会大跌；20年内会迎来人工智能觉醒的起点……其实，类似以上这些，没有谁敢打包票说自己知道确定的答案。毕竟，导致这些事件发生的各种因素太多，既有外因、内因，更有无数偶然，你无法穷尽这其中所有可能的变量。

同样的道理，在这个充满不确定性的世界里，没有人可以清楚地告诉你未来到底是什么样的。很矛盾的是，对“不确定性”本能排斥的我们，却又喜欢通过各种方式猜测、预测未来，意图能够掌控未来。于是，从巫术到宗教、从哲学到科学，人类总是在想尽一切办法试图冲破时间的牢笼。

未来那些事

关于地球和宇宙的故事讲述到这里，也不妨去一起展望未来。看一看，借助科学我们是否真有可能冲破时间的牢笼。

随着科学的发展，随着越来越多的规律被总结，越来越多的理论被人们掌握，如今看来，有些“未来的事”我们不仅可以预测，甚至可以预

测得非常精准。比如，仅仅通过纸和笔，就可以精确到秒地预测“2035年北京日全食发生的具体时间”；在大部分时候，通过手机软件也可以相对准确地预测某地一个小时后的天气情况；如果说给我们一大堆碳14原子，有几百亿个、几千亿个那么多，那我们也可以非常自信地说，5370年后，这里面将会有一半衰变成氮。

人类如今能做到这些，已经非常了不起了。这样的成果，也常常让我们感叹科学的伟大。可遗憾的是，还有很多事情，恐怕在我们的有生之年还看不到人类准确预测它的那一天。比如，天文学家无法预知，下一次人类肉眼可见的超新星爆炸会在何时发生在哪一片天空；气象学家也没办法准确地告诉你，明年的此时你现在所处的城市天气如何；物理学家也无法预测，单个碳14原子会在何时发生衰变。

做不到这些也不是科学家无能，恰恰是因为不确定性本来就是这个世界的基本规律之一。这背后，既有量子力学在捣鬼，也有混沌系统在使坏。在这样的背景下，未来又成了相当扑朔迷离的。

可这样一来，这一章又从何谈起呢？其实方法也不是很难——科学和技术发展到今天这种地步，科学家有非常多的理论和工具，使得我们可以根据已知去预测未知。对于那些无法确定具体发生的事件，科学家则大多会给出“某个事件在某个时间段发生的概率”。

虽然说长周期的天气预报属于世界性难题，但是我们可以说：未来1年，上海下雨的概率一定是接近100%的。我们都知道预报地震很难，但未来1年内地球发生一次6.5级以上地震的概率也几乎是100%。这样的预测，跟某位大仙说你以后一定会生病、一定会死是一样的，虽然不好听，但这也是对未来非常合理的预测和客观事实。

明白了这一点，对于接下来我们即将展开的时间之旅，理解起来就会顺畅许多。当我们把时间的尺度拉得足够大时，许多当下认为几乎不会发生的小概率事件，发生的概率也在随时间的拉长不断增大，直到接近100%。

而这个时候，我们的地球、太阳系甚至是整个宇宙究竟会是怎样的呢？

未来1万年内

未来1万年内最需要探讨的事情应该是气候问题，极端一点，有些事情可能会来得更快一些，比如全球变暖。记得《国家地理》杂志之前曾做过一套地图，模拟的是“全部冰川融化流入海洋”的场景：地球的海平面将上升66米，彻底改变各个大洲海岸线的外观。以我国为例，6亿人口居住的东部沿海发达地区几乎将全部被海水淹没——山东会剩下一个岛，上海除了一些残存的高楼，仅会剩下几座小小的岛[(1)]。

至于全球变暖是否真的会演变到融化全部冰川的地步，其实谁也说不准。但是有一点可以肯定：地球历史上的确出现过完全没有冰川的时期，比如侏罗纪，至今还未找到这一时期的冰川遗迹。换句话说，地球是允许“无冰川模式”存在的。

当然，全球变暖依然是个值得我们每个人好好关注的问题。从19世纪中叶开始，我们已经有了非常详尽的气象记录，且大部分地区的数据都未曾间断，这些数据非常直观地告诉我们：过去160多年，全球平均气温呈显著升高趋势，而且，升高的速率在不断加快。这一点，证据确凿。

至于人类活动和全球变暖的关系，简而言之就是：人类不断排放温室气体，阻止了地球能量释放到太空，所以升高了整个地球的气温，或者说有更多的太阳能被压制在大气层以内——大家所熟悉的温室效应。

不过，还有另外一种声音：人类根本不应该担心全球变暖的问题，而应该慎重考虑一下“全球变冷”这个大危机。想象这样一幅场景：整个北美大陆被冰覆盖，永久冻土带会蔓延到北京附近。全球平均温度比现在所处的时代低5～10℃，而大量的水形成的“陆冰”会让海平面比现在

低大约120米。推算一下，这种情况下，想要在上海看海是不行了，要向东或者东南走上800多千米，大概要到如今的琉球群岛才行。

除了寒冷，这种情况还会导致很多地方出现严重的干旱和沙漠化。这种场景其实无须过多想象，毕竟曾真实地发生过：在2万～2.5万年前末次冰期冰川最广布的时期，学术界将这段时间称为“末次盛冰期”。虽说这个时候的地球和“雪球地球”相比还算是温暖，也没有那么多的冰川，但气候条件依然非常可怕（详见第二章第1节）。

虽然说，以人类目前的技术手段，活下去或者“留下文明的种子”应该不成问题，但这种气候，像我这种特别讨厌冬天的人肯定受不了。末次冰期前后大约持续了10万年[2]，在更早的时候是一段差不多持续了两万年的相对温暖的间冰期。

小知识点补充

如何了解过去的气候变迁？

科学家通过研究钻取的南极冰芯，可以了解过去百万年的地球气候变化，就像研究年轮那样。他们会研究冰芯内裹挟的二氧化碳的浓度，这种信息就像地球的气候档案般被很好地保存着。二氧化碳浓度高，就证明地球平均气温比较高，反之则偏低。借助冰芯，我们可以清楚地划分出冰期和间冰期，并且判断两者之间交替往复的周期。再结合地质学的其他一些证据，比如岩层，科学家就大致掌握了过去几百万年来地球的气候规律。

科学家分析，大约从240万年前开始，地球再次进入了冰川作用活跃的时期，这也就是所谓的冰河时代。寒冷的冰期和温暖的间冰期总是交替出现，有一个术语专门描述这种现象：冰期-间冰期旋回。

一次旋回的时间跨度大概是10万年。更重要的是，相对于漫长的冰期，间冰期持续时间比较短，可能只有1万～2万年。考虑到上一次冰期的结束大概在1.15万年前，按照这样的规律，我们似乎正好在一次旋回的门槛上。这也是有学者提出“全球变冷说”的主要原因。

提出这种观点的科学家，除了一部分人因为和自己利益相关，更多的是基于地质学、冰川学的研究证据所提出的推测。毕竟，我们还没有办法证明整个旋回已经彻底终结。如果过去温暖的1万多年，仅仅是一个间冰期，那我们似乎真要担心下一次冰期是否会在未来几千年内不期而至了。

至于未来的1万年内，地球到底是变暖还是变冷，我们没有办法给出答案，而科学界也一直在争论不休——毕竟人类有气象记录才几百年，要想预测地球大时间跨度下的气候变化还是非常困难的。这一部分，留给你当作一个开放题吧。

小知识点补充

未来的星空

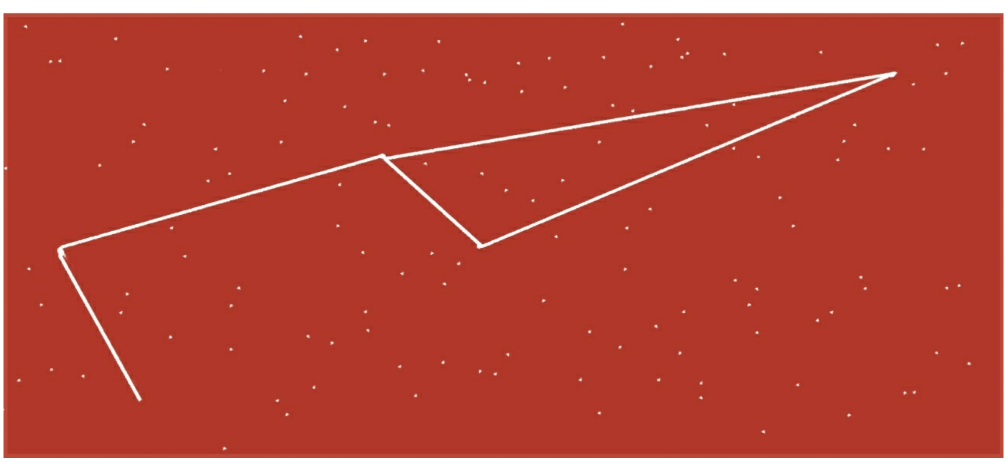
相较于预测未来的温度，预测未来的星空变化就显得容易许多。“北极星”一直是相对的概念，它并不是一个特定的恒星。现在说的“北极星”是小熊座α，它是目前肉眼可见的亮星里最靠近北天极的一颗星。由于岁差[3]的存在，北天极对应的位置每隔25800年就会在星空中画出一个圆。所谓皇帝宝座轮流坐，众星环绕的北极星宝座也是要轮流坐的。

在5000年前，北极星是谁呢？是天龙座α星，中国古代称它为右枢，如今就是小熊座α星了，再过12000年左右就轮到天琴座α星也就是

织女星了。如果多转几轮下去，就不一定是天龙座α、小熊座α、天琴座α轮流坐了。



我们以为永恒不变的星空其实只是相对概念，运动才是宇宙的本质，地球绕着太阳转，太阳绕着银河系中心（银心）转，其实银河系中的恒星也都在绕着银心的超大质量黑洞转。在我们看来，宇宙中每一颗星都有自己独特的轨迹。从我们地球视角来看，这些星星都在一个球面上运动，我们称这种运动为“自行”，只不过对我们短暂的一生来讲它们动得实在太慢了。只有经过几万年再来看，才会发现非常明显的变化。如果把号称“人肉星图”的水兄[4]扔到15万年之后，估计他看到那时的满天繁星也会迷茫吧——几乎所有我们熟悉的星座都会和现在大不相同，如图所示。



15万年后北斗七星的模样

未来100万年内

100万年内，有一件天文爱好者们一直盼望的大事必然会发生——参宿四（猎户座α）的爆炸。在冬季星空当中，参宿四是非常显眼的，在人类观测它的绝大部分时间里，是夜空中除太阳外第10亮的恒星[5]，质量是太阳的18倍到23倍，体积是太阳的16亿倍。如果把它放到太阳系的中心，它可以把木星都吞到肚子里。而参宿四和地球的距离也“不过”是640光年——在银河系中，这个距离其实算是与我们同在一个小区的邻居了。

参宿四之所以这么巨大，是因为它已经进入生命的末期。它其实是一颗红超巨星——根据它的质量，可以推测它有极大的概率以Ⅱ型超新星爆发来结束它的一生。而这事发生的时间，可以是从现在开始至多100万年之内的任何一天。

我们也不妨畅想一下：如果它真的爆炸了，天空会是怎样的场景？如果我们从超新星的性质来看，它的亮度一定会增加到原来的10万倍以上，甚至更多。拿月亮类比的话，接近满月时的约-12.5等[6]。在这种情况下，只要没有云层遮挡，白天也能轻松看到参宿四。而且这种情况会持续数周，此后它的亮度会慢慢减弱，但还是会在我们肉眼可见的范围内持续很长时间。

前面我们也提过，参宿四离我们不算远，所以有些人可能会担心：要是参宿四真的炸了，而且有可能在我们的有生之年炸，地球会不会也跟着毁灭呢？

记得2012的末日谣言也提到过参宿四，还提到了中微子的影响。的确，伴随着超新星的爆炸，确实会产生很多中微子，而地球上的人将会经历一场“中微子雨”。虽然听上去十分吓人，但也不用太过担心。因为中微子的性质就是“穿透力非常强”，它几乎不和其他物质发生相互作

用。所以，那么多“雨点”会径直穿过包括人体在内的其他物体，而我们丝毫不会感到异样。

其实，比起天上的参宿四，100万年内我们真正要担心的事，或许隐藏在我们脚下。有座巨大的著名活火山，就潜伏在著名的美国黄石公园里。虽然地方很美，但那里恰恰是地球上为数不多的，依然处于活跃期的超级火山。

如果黄石超级火山爆发的话，它的威力是广岛原子弹爆炸威力的近千万倍，几乎每一个美国人都会受到冲击，甚至给全世界的自然生态带来灾难性的影响。那个时候，就真的和《2012》电影中描述的场景几乎差不多了，地球可能就此重新回到冰河时代（具体的场景，你可以回顾一下之前的《浩劫与重生》）。

作为一座处于活跃期的超级火山，历史上它喷发过很多次：在210万年前、130万年前、63万年前它都有过大规模的爆发。虽然谁也说不准下一次它会在什么时候喷发，但是很多研究都预计，100万年内它总得再来上一回。

如果你算一算它喷发的间隔，是不是觉得有点吓人？当然，我们再把数据时间继续往前推，它的喷发间隔并不是60万年左右。先前的推测也是基于最近三次的喷发时间进行的。当然，这种超级火山的喷发是比较任性的，100万年内是否会喷发，就真不好说了。希望未来的后浪，届时能做好准备吧。

对了，在未来的100万年内，危险不仅仅来源于地下，也可能来源于天上，比如来自太阳系内的危险，小行星。虽然我们常常会说“大质量的小行星撞击地球的概率是微乎其微的”，但这是指当下。一旦时间尺度延展到100万年，一颗直径为1000米的小行星和地球来个亲密接触的可能性是极大的，而历史上也曾多次发生过这种事情。这种程度的撞击虽然比不上白垩纪末期的那一次，但是在之后的几年造成全球性的生态灾难或者说小行星撞击冬天等则是必然的。

接下来的这100万年似乎有点“危机重重”，人类时刻准备着吧！

未来1000万年内

再来看看1000万年内的情况。对太阳系来说有件大事，大约在130万年以后就会发生——有一个神秘访客会来“走亲戚”。

这位神秘访客并非外星人，而是一颗届时会离我们非常近的恒星。这件事会发生的概率很大，相关的预测基本上比较准确。比邻[7]的叨友们要注意了，接下来要说的这颗星和你们的命运相关，毕竟“比邻星”和“北极星”都是相对概念，你们的母星要换人了。不过，这个还不仅仅是换了一颗“比邻星”那么简单。

小知识点补充

轮换的比邻星

其实不到130万年后，由于恒星自身的缘故，比邻星就要换“人”了。我们肉眼可见的恒星其实都在银河系内，与我们的距离基本都在数百光年之内。前面说过，它们也在绕着银心转，而且都有各自的路径和速度，所以，它们与我们的相对位置也会经常发生变化。这就使得，有不少星星都有可能成为距离我们最近的星星——登上“比邻”的宝座。

这位“访客”是格利泽710[8]。它肯定是距离我们挺近的一颗恒星了，现在它距离我们多远？它现在位于巨蛇座的头部，距离我们62光年。目前看来，它离“比邻”这个位置还相去甚远。如果说距离我们640光年的参宿四，算是和我们在同一个“小区”，那62光年远的格利泽710最多只能算是“对楼”，绝对谈不上“比邻而居”。

但130万年后，情况则大不一样：根据2018年4月25日盖亚卫星[(9)]发布的数据进行的预测，届时它和我们的距离为0.178±0.038光年。请注意这个极小的取值范围。有天文学家预测，格利泽710有90%的概率会进入太阳系奥尔特云以内，这意味着它已经“侵入”太阳系的领地了。这时候的格利泽710，甚至都称不上“邻居”了——简直是破门而入，甚至睡在太阳系的床上！

比喻有点烂，大家别嫌弃。格利泽710是一颗K型的恒星，质量大概是太阳的0.6倍，直径是太阳的0.6～0.7倍。考虑到那时候它的位置，估计亮度可能和金星相当，成为天空中除了太阳外最为明亮的恒星，甚至白天可见。

问题来了，既然它将进入奥尔特云以内，那会不会给我们创造更多的彗星，并影响柯伊伯带的天体？那时的格利泽710又是否会成为太阳的一颗伴星，或者说成为一个双星系统？这样的猜测，还是留给你吧。

未来1亿年内

再看看更大的尺度，未来1亿年内会发生哪些大事？

首先，大概率会发生的令人震撼的事情，应该是有一颗直径在10千米左右的小行星和地球的“亲密接触”。而上一次地球遇到这种情况，则是6600万年前。谨祝未来的地球人，好运。

考虑到那个时候的火星，大概率已经成为人类的殖民地，所以我们还可以关注一下“火卫一的解体”。这颗直径只有27千米的卫星，距离火星实在是太近了，连10000千米都不到。[(10)]这样一来，火卫一就会受到火星巨大潮汐力的影响。又因为火卫一的公转速度远远大于火星的自转速度，所以火星的潮汐力就会拖累火卫一。这会慢慢消耗火卫一的运动势能，降低它的运行速度。随之而来，它的轨道半径还会逐渐地变小。

就好比是一场拔河比赛，火星的引力会慢慢分解火卫一的表面。开

始它表面会形成裂纹，这之后的3000万～5000万年，有科学家预测，火卫一会被火星的潮汐力完全粉碎。直白地说，就是火卫一会进入火星的洛希极限。根据模拟，火卫一会在距离火星地面大约680千米处分解，由于这些碎片具备高速运行的势能，它们并不会径直向火星砸去，而是会在680千米的高度形成一个环状结构。

不过它和土星环有很大的区别，既不可能非常庞大，也不可能分散成很大一片区域。科学家分析，这些碎片很有可能是“团状的”——从火星上看会多了一片“云”。这个环会逐渐扩散、扩大，并会绕着火星持续长达1亿年的时间，而“火星环”的持续时间取决于环的高度。不管怎么说，这个环还是临时的，它最终还是会成为火星的一部分。

这就意味着，这一时期的火星是非常危险的！会有不少碎片陆陆续续砸到火星表面，算是对未来人殖民火星的风险提示吧。

未来**10**亿年内

再来说说未来10亿年内会发生的事情。

先来说一个数字：2.5亿年。这是太阳绕银心走完一周的时间。可以理解为，2.5亿年后太阳完成了一个极其漫长的“银心回归年”。

对地球来说，2.5亿年也是一个很有意思的时间节点——根据之前的一项预测，在那个时候会有一个新的超级大陆“究极盘古大陆（Pangaea Ultima）”最终成形，而上一次地球出现几乎所有大陆连在一起的情况，还是在距今两亿多年的恐龙时代（详见第三章第4节）。

当然，“究极盘古”也并非意味着这是最后一个超级大陆。还是那句话：天下大陆，分久必合合久必分。只要地球还处在地质活跃期，这种循环或许还会继续下去。只不过，每一次出现的超级大陆，几处大陆块的组合方式各不相同。



给大家描述一下2.5亿年后的超级大陆大致是什么模样：北美和南美这两个陆块会先碰撞在一起，加勒比海和北冰洋将会消失；欧亚大陆、非洲、澳大利亚、南极则会相继聚在一块；[(11)]再之后“新美洲大陆”和“超级欧亚非澳南大陆”将会完成最终的组合。届时，印度洋会被围在新的大陆中间，成为一个巨大的“内陆咸水湖”，整个板块的样子从上空看像一个甜甜圈。甚至，真有科学家给这个新大陆起过“甜甜圈大陆”这种可爱的名字。

小知识点补充

日全食的消失

十几亿年后，有一件事的发生或许会让天文爱好者非常难过——地球上再也没有日全食了。

因为引潮力的作用，月球正以每年3.8厘米的速度远离地球。在不考虑其他因素的情况下，最快大约12亿年之后，月球的视直径就将小于太阳的视直径。这就意味着，即便月球处在近地点，也无法完全遮挡住太阳。到那个时候，只剩下日环食可以观赏了。

当然，我们或许真是在杞人忧天。毕竟，那时候的地球上还是不是住着人都不好说了。而且，太阳看上去也可能比现在要大一点点，所以日全食消失的时间恐怕会更早。

未来100亿年内

要知道，太阳也不是永恒的。随着核心燃料的耗尽，太阳总有一天会成为一颗红巨星。大约45亿年后，这颗红巨星会开始逐渐吞没水星、金星，它的直径会变成现在的150多倍，接近地球轨道。届时，地球上的温度会达到数百摄氏度，不用说所有的水都会蒸发殆尽了，许多低熔点的金属都会变成液态。

地球有没有可能直接被吞没呢？这个问题还不能确定。虽然我们已经基本掌握了恒星的模型，但恒星的核心是什么样子的，天文学家并不完全知晓。

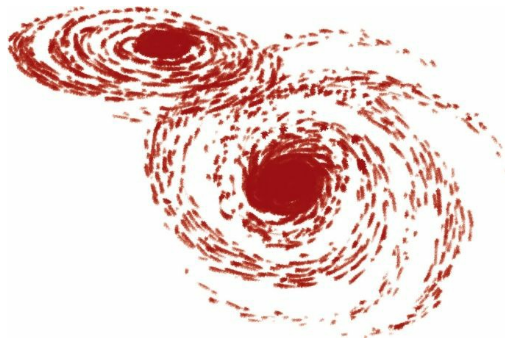
一个还算安慰的消息则是：地球逐渐从温暖变成“炼狱模式”的同时，宜居带也会相应地外推。先是火星会变得更温暖；再后来，木星的卫星、土星的卫星、天王星、海王星的卫星都有可能成为备选的“宜居家园”。话说回来，如果那时候还有人类文明，估计早就移居其他恒星系了。

太阳的红巨星阶段，不过数十万年。最终，随着一阵夺目无比的氦闪，它会化作一片绚烂的行星状星云。核心处，则是它的残骸，一颗暗弱的白矮星。

在这个时间跨度里还有一件事必须要提，我们的银河系将和仙女座大星系（M31）来一次碰撞。这绝对是未来100亿年内，除了“太阳之死”外最精彩的宇宙大戏！

目前可以确定的是：仙女座星系正在以300千米／秒的速度靠近银

河系。所以，在未来的几十亿年时间里，它会和银河系产生相互的引力影响。两者都会逐渐变形、反复拉扯，在经历了数十亿年的“宇宙华尔兹”后，它们极有可能会最终融为一体，成为一个巨大的椭圆星系。



或许你会担心：这样剧烈的碰撞，对生活在银河系里的人类来说怎么办？毕竟，几十亿年后，我们的文明极有可能是个“银河文明”了呀。的确，在这样的“拉拉扯扯”中，两个星系的恒星会变得非常混乱，有的可能会重新组成团，有的可能会被甩出去。不过好在，恒星与恒星之间非常空旷，它们并不容易碰撞到一起[(12)]。更不用说，这个过程要花好几十亿年的时间了。以我们能感知到的时间而言，在“大碰撞”发生的任何一个阶段，你所看到的夜空，都和现在的一样“平静”和“永恒”。

未来**10000**亿年内

又是几百亿年过去了。

在此期间，有的星星诞生了，有的星星熄灭了。

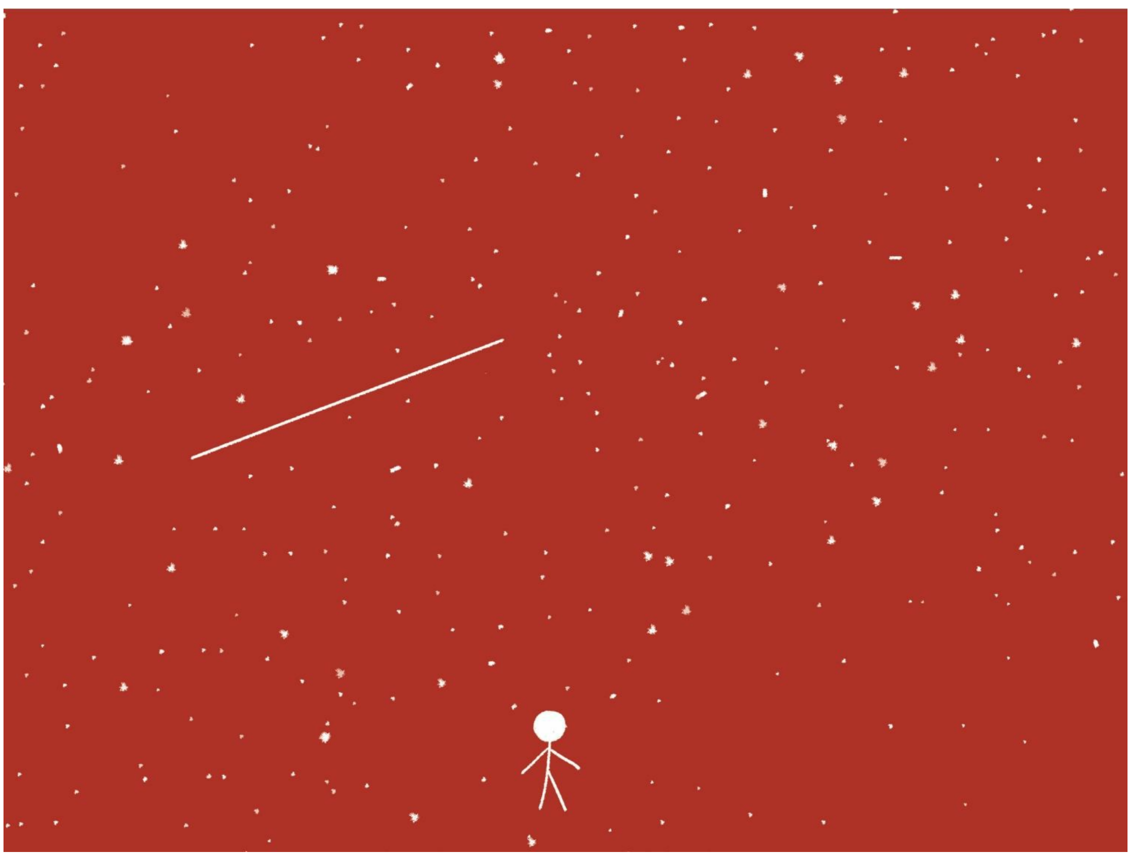
又是几千亿年过去了。

虽然依然还有星星诞生，但会有更多的星星熄灭。新生的恒星越来越少，大质量的恒星也越来越难形成，最后剩下的差不多都是红矮星了，而且有可能大部分是肉眼不可见的红矮星。因此，星空会变得越来越黯淡。

更为悲哀的是，那个时候的文明，如果还有文明的话，能看得见的

宇宙比现在有限得多。因为宇宙膨胀。如今，我们已经掌握了宇宙正在加速膨胀的明确证据。照此推算，总有一天，亿万的星系都会进入“视界”之外。也就是说，它们的光线再也到达不了我们这里，只留下我们银河系所在的本星系群的几十个星系。而且，大约4500亿年后，本星系群的47个星系或许还将汇聚成一个大星系。

这时候的宇宙，真就成为一个“孤岛”了。那个时候的天文学家，就算拥有再先进的望远镜，恐怕也只会认为：宇宙中并没有多少星系。不知道，仰望那种黯淡甚至漆黑的星空会是怎样的体验？是否还会有智者问出诸如“夜空为什么是黑的”这样的问题？是否还会对宇宙心向往之？



只能说，或许我们没有生活在宇宙最美好的时代，但这个时代也绝对不是对我们而言最坏的时代！

小知识点补充

再后来的事情

1万亿年，这是气态星云耗尽的最少时间，星系之间将不再形成新的恒星，如果暗能量密度恒定的话，宇宙扩张的速度将使大爆炸的证据再也不可解；

100万亿年，这是气态星云耗尽的最多时间，这时所有的恒星都将逐渐耗尽氢原子并且死去；

120万亿年后，宇宙中大质量天体只留下矮星、中子星和黑洞；

1000万亿年后，白矮星太阳表面将冷却到只有5开；

3×10^{43}年后，宇宙中唯一剩下的天体可能就是黑洞了；

1×10^{106}年后，几乎所有的黑洞都因为霍金辐射而消失，宇宙中的所有物质都会衰变成亚原子形态并分崩离析。

$(10^{10})^{12}$年后，宇宙中所有物质的运动都无限接近于零，宇宙最终死亡……

——（英）爱丁顿（A.S.Eddington）《膨胀的宇宙》

---

(1) 上海境内海拔高于66米的山仅6座，其中西佘山、天马山约100米，东佘山、辰山、薛山、横山均在70米左右。

(2) 末次冰期也叫沃姆冰期（Wü rm glaciation），大约开始于11万年前，结束于1.15万年前。

(3) 岁差，又称地轴进动，是指某一天体的自转轴指向在其他天体的引力的作用下，相对于空间中的惯性坐标系所发生的缓慢且连续的变化。类似于陀螺在旋转时，自转轴本身也会做圆周运动。

(4) 水兄，本名施韡，本文天文部分的作者，上海天文馆网络科普部部长、上海市天文学会副秘书长。

(5) 2019年至2020年，其亮度一度下降至平均亮度的40%，此后又逐渐恢复正常。排除了成为

超新星的可能后，科学家认为是尘埃或气体云遮挡所致，也可能是由巨大的类似黑子的“冷星斑”引起。

(6) 这里指的是视星等，数值越小就越明亮。

(7) 这是音频节目《原来是这样》的九个粉丝社群天狼、北极、大角、织女、比邻、开阳、文曲、南斗、牵牛之一。

(8) 格利泽近星星表（Gliese Catalogue of Nearby Stars），收录了距离地球22秒差距内的1500多颗恒星，格利泽710就是其中之一，详见本系列丛书《天文原来是这样》。

(9) 盖亚（Gaia）是欧洲空间局的空间望远镜。其任务是要绘制一个包含约10亿颗或银河系1%恒星的三维星图。

(10) 火星上有一个很有意思的天象，火卫一会从西方升起，4个小时之后就从东方落下，这是因为火卫一离火星非常近，所以它运动的速度就会非常快，它的公转周期是快于火星的自转周期的。

(11) 也有预测认为，澳大利亚陆块将与南极陆块相撞并到达南极点。

(12) 如果我们把恒星比作沙砾，在“银河系”中平均相隔1000米才能遇到另一颗沙子，所以它们之间是非常空旷的，两颗恒星碰撞的概率非常低，大家不用太过担心了。

写在后面

《原来是这样？！》（以下简称《原样》）开始讲述地球史的故事，应该源自《063：浩劫与重生》，子凌令人惊艳的纪录片解说式的开头，应该给不少叨友留下了深刻的印象。这一期，其实也可以算是此后所有地球生命史相关内容的基本框架。

此后的几年，《万物之龄》《雪球地球》《大登陆时代》《陆与海之歌》《如果宇宙只有一年》《我们从哪里来》《未来那些事》《兽族崛起》《人类起源》......每每讲述这种带点史诗意味的话题，总会让我格外地沉醉。而这些彼此交织、相互关联的话题，其实也最能体现《原样》的最初设定——串联知识的经纬线。

音频节目的魅力在于：借助听众的想象力，只要你的叙述足够生动，再点缀些合适的音乐音效，就可以营造出非常不错的史诗感。这时候，没有画面，反而成了一种优势。不过，一旦涉及具体事物的样貌，尤其是从未见过的东西，脱离了图片，就很难仅靠想象构建出一个相对接近真实的视觉感受。这种情况，在通常需要辅以大量图鉴的古生物类科普读物中，就显得尤为突出。因此，大约从《陆与海之歌》开始，出这样一本书的念头就已经产生了。

当然，如何将原本是对话体的节目文案，重新改写成适合书面阅读的文字？如何在书本的框架内重新梳理线索？如何选择合适且相对准确的配图？处置这些问题，也都是与创作音频节目文案完全不同的体验。

这里，要特别感谢主动请缨承担本书美术创作的叨友徐圳星，以及他厉害的创作团队；还有花费了大量的时间，对本书的文字内容进行了第一遍审校的叨友汪涛。很大程度上，是因为你们的帮助，才让《原样》的味道与品质，得以在纸面上继续延续。

对了，地球生命的历史虽然是客观存在的事实，但随着越来越多新证据的出现，我们对于古生物的认识与想象，其实一直在不断地刷新。如果你读得足够仔细的话，你应该能发现其中不少的内容，已经和之前音频节目里讲的有些许不同了。因此，几乎必然的是，这本书中的部分知识点，会在未来（甚至已经）被更新的研究所刷新。

还是那句话：书上写的，不一定都是正确的。这本书最大的初衷，仍是希望守护或唤起你的好奇心。这同样也是《原样》这档音频节目一直在做的。

借着这个机会，依然想要特别鸣谢一下陪伴着节目一路走来的诸位搭档：洁羽、子凌、姜雯、水兄、冰枫、U医生，感谢你们为节目增添的欢乐与温度，也谢谢你们为节目注入的理性与硬核。

同时，也要再次感谢这些年来为我们提供过许多高质量文案的小黑、山珊、萌萌微生物、我恨我的光鲜、豌豆君、飞扬、耿思锐、末问、兔子喵、冰诺、何鑫、赵一玮、东明先森、肆舞贰拾、小A、天艺、闻道文、嘉珩、董毅强、冷翊、丫头、颜如玉、李元方、蒋邦胜、青青大人、赵乐、Jeffry、朱文靓、瘦陀、曙光、小靓、星辰（排名不分先后）等一众文案作者。是你们的文案，拓展了节目的广度，也为大家打开了更多学科的“窗子”。至于在节目里感谢过很多次的图文组、音乐组，以及文案组里没点到名的其他小伙伴们，这里也再次专门谢过！

最后，仍然要感谢七年多来所有通过各种方式支持和帮助过《原样》的你们。

《原来是这样？！》的未来，也期待能和你们共同书写！